

插铣技术在诱导轮加工中的应用

史 勇, 何卫东, 卢 博
(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘 要: 介绍了采用 UG TCL 程序算法计算仿真插铣诱导轮的加工工艺。通过 DEFORM 软件计算插铣诱导轮工艺参数, 并经工艺优化得到了一套插铣加工诱导轮的最佳工艺规范。采用该规范加工的诱导轮满足设计要求。装配该诱导轮的发动机通过了热试车考核。

关键词: 插铣技术; 诱导轮; 液体火箭发动机涡轮泵

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 01-0076-05

Application of plunge milling in inducer machining

SHI Yong, HE Wei-dong, LU Bo
(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

Abstract: A UG TCL-based calculating method of plunge milling in inducer machining is introduced. DEFORM software is used to calculate the technological parameters of inducer plunge milling. A process specification for inducer plunge milling was obtained after process optimization. The inducer machined with the process specification met the design requirements, and passed the engine hot test.

Keywords: plunge milling; inducer; turbopump of rocket engine

0 引言

插铣技术是一项正在迅速发展的新型加工技术, 可在 z 轴方向上快速铣削大量金属。该技术加工效率高, 在加工过程中刀具沿主轴方向做进给运动, 利用底部的切削刃可进行钻、铣组合加工。在重复插铣达到预定深度时, 刀具不断缩回和复位, 便于下一次插铣时迅速从重叠走刀处去

除大量金属^[1-5]。本文介绍利用插铣工艺技术加工诱导轮的工艺过程。

1 诱导轮结构和设计要求

诱导轮是液体火箭发动机涡轮泵的关键部件。诱导轮为多头变截面螺旋叶片结构, 型面复杂, 工作转速高 (5 000~10 000 rpm), 设计精度要求高。诱导轮的二维结构见图 1。

收稿日期: 2013-09-23; 修回日期: 2013-10-16

作者简介: 史勇 (1983—), 男, 工程师, 研究领域为数控加工工艺

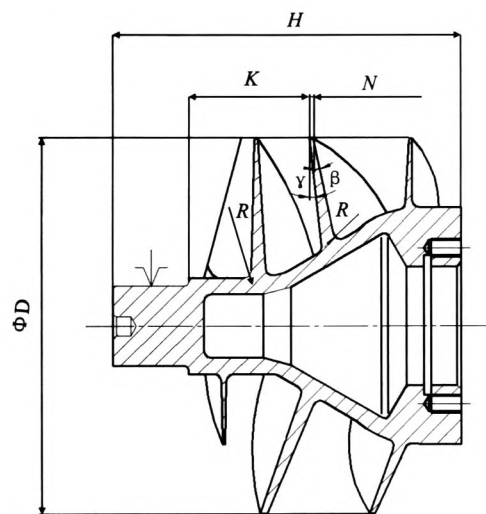


图 1 诱导轮二维结构图

Fig. 1 Two-dimensional structure of inducer

诱导轮轮毂由圆滑曲面构成。叶片呈扭曲状, 叶尖左右两侧分别由离散点组成自由曲线, 叶片根据叶尖离散点角度射线形成直纹螺旋曲面。诱导轮的设计技术要求见表 1。

表 1 诱导轮设计技术要求

Tab. 1 Main technical specifications in inducer design

项目	ΦD	H	加工材料	γ 公差	叶片圆周分度精度
要求值	± 0.1	± 0.05	TC4	± 8	$\pm 15'$

项目	N 公差	β 公差	表面光洁度	K 公差	叶片轮毂交角 R
要求值	± 0.05	$\pm 10'$	$Ra 1.6$	± 0.05	± 0.1

2 诱导轮插铣工艺仿真计算

诱导轮叶片插铣过程中, 刀具沿叶片直纹方向连续上下运动, 去除材料, 单个纹路依据直纹变化规律连接形成整个型面, 提取叶片直纹作为轴向插铣刀路特征。

设工件坐标系为 o_wxyz , 叶片按刀具半径偏置后任一顶点坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 直纹矢量为 $\alpha(I, J, K)$, 工件坐标系与加工求解坐标系一致, 使用 A 和 B 转台卧式加工中心。插铣点位转换原理见图 2。

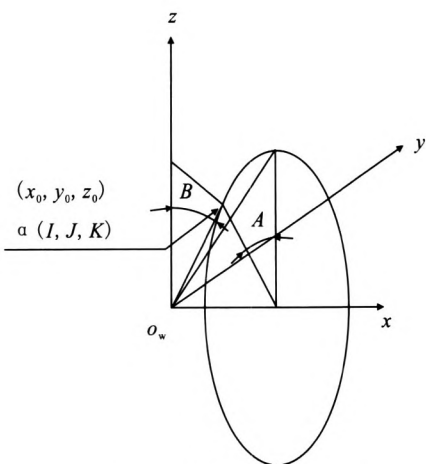


图 2 插铣点位转换原理图

Fig. 2 Transforming principle of plunge points

通过求解曲面偏置后任意直纹位置的起点、方向和终点, 以确定插铣加工的定位方向和刀位点。其求解过程如下:

首先, 将直纹矢量 α 的转动转化为刀具相对于工件的转动, 使刀具相对于工件绕 x 轴逆时针转动 A 角, 然后使刀具相对于工件绕 y 轴逆时针转动 B 角, 其中 B 和 A 角的计算公式如下:

$$\left\{\begin{aligned} B &= \arctan \frac{I}{\sqrt{J^2 + K^2}} \quad (I > 0) \\ B &= 90^\circ - \arctan \frac{\sqrt{I^2 + J^2}}{K} \quad (I < 0) \\ B &= 90^\circ \quad (I = 0) \\ A &= 90^\circ - \operatorname{atctan} \left| \frac{K}{J} \right| \quad \left(\begin{matrix} K \geq 0 \\ J \geq 0 \end{matrix} \right) \\ A &= 270^\circ + \operatorname{atctan} \left| \frac{K}{J} \right| \quad \left(\begin{matrix} K \geq 0 \\ J \leq 0 \end{matrix} \right) \\ A &= 90^\circ + \operatorname{atctan} \left| \frac{K}{J} \right| \quad \left(\begin{matrix} J \leq 0 \\ K \leq 0 \end{matrix} \right) \\ A &= 270^\circ - \operatorname{atctan} \left| \frac{K}{J} \right| \quad \left(\begin{matrix} J \geq 0 \\ K \leq 0 \end{matrix} \right) \end{aligned}\right.$$

工件坐标系下的插铣起点直线坐标转换过程如下:

工件绕 x 轴旋转插铣定位 A 角度, 变换矩阵为

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos A & -\sin A & 0 & 0 \\ \sin A & \cos A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

工件绕 y 轴旋转插铣定位 B 角度, 变换矩阵为

$$T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos B & -\sin B & 0 \\ 0 & \sin B & \cos B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

那么 $(x \ y \ z \ 1) = (x_0 \ y_0 \ z_0 \ 1) T_1 T_2$, 计算后的直线坐标如下:

$$\begin{cases} x = x_0 \cos A + y_0 \sin A \\ y = -x_0 \sin A \cos B + y_0 \cos A \sin B + z_0 \sin B \\ z = x_0 \sin A \sin B + y_0 \cos A \sin B + z_0 \cos B \end{cases}$$

由计算过程可知, 直纹线偏置后提取的刀具起点和终点方向一致; 插铣加工过程中, 刀具沿轴向运动。通过 UGTCL 刀轴命令语言, 定义算法中 x, y, z, A, B 在编程语言中变量如下:

```
mom_pos (0)      x 坐标
mom_pos (1)      y 坐标
mom_pos (2)      z 坐标
mom_out_angle_pos (0)  B 坐标
mom_out_angle_pos (1)  A 坐标
```

坐标点计算算法封装到 TCL 逻辑语言中, 部分代码如下:

```
... ...
set mom_sys_rotary_error 0
set a4 [expr $mom_alt_pos (3) +360.0]
set a5 [expr $mom_alt_pos (4) +360.0]
while { [ expr $a4 - $mom_kin_4th_axis_min_limit] > 360.0 } {set a4 [expr $a4-360.0]}
while { [ expr $a5 - $mom_kin_5th_axis_min_limit] > 360.0 } {set a5 [expr $a5-360.0]}
if { $a4 <= $mom_kin_4th_axis_max_limit && $a5 <= $mom_kin_5th_axis_max_limit } {return}
for {set i 0} {$i < 2} {incr i} {
    set rot ($i) [expr $mom_pos ([expr $i+3]) - $mom_prev_pos ([expr $i+3])]
    while { $rot ($i) > 180.0 } { set rot ($i) [expr $rot ($i) -360.0]}
    while { $rot ($i) < 180.0 } { set rot ($i)
```

```
[expr $rot ($i) +360.0]}
    set rot ($i) [expr abs ($rot ($i))]
    set rotalt ($i) [expr $mom_alt_pos ([expr $i+3]) - $mom_prev_pos ([expr $i+3])]
    while { $rotalt ($i) > 180.0 } {set rotalt ($i) [expr $rotalt ($i) -360.0]}
    while { $rotalt ($i) < 180.0 } {set rotalt ($i) [expr $rotalt ($i) +360.0]}
    set rotalt ($i) [expr abs ($rotalt ($i))]
}
... ..
```

通过 TCL 程序语言封装, 固化插铣工艺算法, 对提取的直纹曲面坐标点形成连续加工路径。加工过程中使用的工艺参数, 通过 DEFORM 软件, 运用正交实验法, 进行插铣切削力和切削温度仿真, 根据刀具实际性能优化确定工艺参数, 仿真方法及过程如下:

1) 建立刀具模型。刀具模型的建立是根据现使用的伊斯卡公司的插铣刀具, 采用 UG 软件进行构造, 刀具前角 22.25° , 后角 6.75° , 刀尖圆弧半径 1 mm。UG 建模完成后以“.STL”格式导出模型文件, 在 Deform-3D 仿真时导入预先生成的“STL”格式的模型文件。

2) 建立诱导轮材料 TC4 本构模型。工件材料被认为是弹塑性材料, 在切削过程中, 工件材料在切削区域发生变形。其处于弹性变形时的特性参数为弹性模量 E 和泊松比 γ ; 进入塑性变形后, 通过流动应力模型即本构方程来描述材料的特性。本构方程用来描述材料的状态变量 (应力、应变、温度等) 间的关系, 主要是应力与应变之间的关系。仿真过程中采用 Johnson-Cook 本构方程模型公式:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right) \left[1 - (T^*)^m \right]$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}$$

式中: σ 为等效流动应力, MPa; A 为材料初始屈服应力, MPa; B 为材料硬化常数, MPa; n 为材料硬化指数; C 为材料应变率常数; m 为材料热软化指数; ε_0 为材料参考应变率, s^{-1} ; T_m 为材

料熔化温度, K; T_r 为环境温度, K。

3) 网格划分。工件初始网格的划分采用相对尺寸法, 指定单元的数量以及最大最小单元的尺寸比值限制。由于切削区应变、应变速率、温度、几何尺寸等变化比较剧烈, 网格需要细化, 在划分网格时可以通过权重因子和网格窗口来进行网格的局部细化。插铣仿真研究时, 在权重因子窗口中设置网格密度窗口为 1, 激活网格窗口, 其余参数采用默认值; 在网格窗口中设置网格细化比例进行局部的网格细化。

4) 插铣铣削力仿真理论依据。插铣切削时, 刀具切入工件, 使工件材料产生变形成为切屑所需要的力称为插铣切削力。切削力是计算切削功率、设计刀具、机床和机床夹具以及制定切削用量的重要依据。

切削力的来源主要有两方面: 1) 切屑形成过程中, 弹性变形和塑性变形产生的抗力; 2) 切屑和刀具前刀面的摩擦阻力及工件和刀具后刀面的摩擦阻力。

切削力计算公式如下:

$$F_x = C_{Fx} a_p^{a_1} f_z^{a_2} v_c^{a_3}$$

$$F_y = C_{Fy} a_p^{b_1} f_z^{b_2} v_c^{b_3}$$

$$F_z = C_{Fz} a_p^{c_1} f_z^{c_2} v_c^{c_3}$$

式中: C_{Fx} , C_{Fy} , C_{Fz} 分别为工件材料和切削条件对 3 个分力的影响系数; a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 , b_3 , c_1 , c_2 , c_3 分别为切削用量对 3 个切削分力的影响指数。

5) 插铣铣削温度仿真理论依据。诱导轮插铣过程主要是固体中的热量传递, 不考虑热辐射的影响。

切削加工中, 单位体积的热产生率 Q 可由下式求得:

$$Q = \frac{k_p \bar{\sigma} \dot{\varepsilon}}{\rho}$$

式中: k_p 为塑性变形功转变为热能的比例系数, 一般取 0.9; $\bar{\sigma}$ 为等效应力; $\dot{\varepsilon}$ 为等效应变率; ρ 为密度。

刀具的前后刀面与已加工表面之间的摩擦热

方程为:

$$Q_t = F_t v_r$$

对流散热系数的设定, 刀具、工件表面与冷却液的对流散热:

$$Q_h = h(T_w - T_0)$$

式中: T_w 为刀具和工件表面温度; T_0 为环境温度, 取 T_0 为 20 °C; h 为表面对流散热系数, h 为 0.4 N/(s·mm·°C)。

根据 TC4 插铣铣削力仿真分析和铣削温度仿真分析, 结合刀具实际制造性能和零件加工工艺要求, 最终选取了工艺加工参数。

3 诱导轮插铣工艺

插铣机床使用五轴五联动双转台式加工中心, 由 x , y , z , A , B 五个运动轴组成。机床主轴为机械主轴, 能够为插铣加工过程提供充足扭矩。装夹方式为: 一夹一顶方式。

诱导轮插铣工艺流程、工艺要点及仿真后的工艺参数如下:

1) 插铣去余量: 根据仿真过程工艺要求, 加工过程控制步距, 防止刀杆因接触应力过大产生扭矩损伤。加工转速为 800~1 000 r/min, 进给速度为 200~230 mm/min, 采用大直径插铣刀具。

2) 半径插铣槽底: 根据仿真过程工艺要求, 加工过程适当增加步距, 保持余量均匀, 刀轴适当前倾提高加工效率, 加工转速 1 000~1 200 r/min, 进给速度为 500~650 mm/min, 采用小直径插铣刀具。

3) 半径插铣叶片: 根据仿真过程工艺要求, 加工过程控制刀具轴线, 保持轴向矢量与叶片直纹线矢量一致, 转速为 2 000~2 200 r/min, 进给速度为 280~300 mm/min, 采用小直径插铣刀具。

4) 型面加工清根: 根据仿真过程工艺要求, 加工过程采用侧刃加工方式保持叶片直纹曲线与刀轴一致, 提高表面粗糙度指标, 稳定叶片质量, 主轴转速为 2 000~3 000 r/min, 进给速度为 200~300 mm/min, 采用侧刃球头刀具。

诱导轮插铣加工过程中, 为了保证实际加工工艺性和预测加工周期, 插铣路径需要综合仿真

优化。通过 UG ISV (unigraphics/integrated simulation and verification) 机床仿真手段, 建立与实际尺寸和功能一样的虚拟加工机床和加工控制器, 对生成的插铣加工路径和仿真形成的插铣工艺参数进行综合评价。这样在刀轨仿真时就能发现机床刀具在加工过程中可能出现的意外情况。此外, 仿真能检查在机床、夹具、刀具和零件间的干涉检测, 实际加工后产品测量结果见表 2。

表 2 诱导轮尺寸测量结果
Tab. 2 Measured results of inducer

项目	ΦD	H	加工材料	γ 公差	叶片圆周分度精度
要求值	± 0.1	± 0.05	TC4	± 8	$\pm 15'$
实际值	$-0.02 \sim +0.05$	$-0.03 \sim +0.05$		$-6' \sim +7'$	$-10' \sim +12'$

项目	N 公差	β 公差	表面光洁度	K 公差	叶片轮毂交角 R
要求值	± 0.05	$\pm 10'$	$Ra1.6$	± 0.05	± 0.1
实际值	$-0.04 \sim +0.03$	$-8' \sim +5'$	$Ra1.6$	$-0.04 \sim +0.03$	$-0.14 \sim +0.13$

仿真过程中, 将加工工艺参数和加工工艺路径与零件装夹方式结合起来, 对加工过程干涉情况和加工效率能够预先给出仿真结果。插铣仿真过程中需要注意以下两点。

1) 切削刀路合理性判别。合理的插铣加工刀路最终都为 z 向进刀, 不允许出现联动进刀, 以防止加工过程刀具与中间毛坯产生碰撞。

2) 切削工艺合理性判别。合理的切削工艺加工后的底面应为“鱼鳞状”刀纹, 加工底部刀纹不允许同一高度有重叠, 以防止加工过程刀具扭矩突变, 影响切削稳定性。

仿真后的加工程序经过 DNC 系统传入到相应机床进行加工, 实际加工后的零件通过使用海克斯康 (HEXAGON) 三坐标测量机进行型面点云及尺寸测量, 测量结果 dwg 格式测量数据转换

为 IGS 格式导入 UG, 与诱导轮设计模型进行匹配对比。结果分析如下。

诱导轮测量结果与设计要求值比较可知, 产品满足设计要求。经过数次水力试验和热试车试验, 发动机扬程和效率等各项指标均满足要求。

4 结论

采用五轴插铣编程数控工艺技术, 完成了难加工材料诱导轮的高效加工工艺过程, 加工产品满足设计要求。该诱导轮装配在发动机涡轮泵中通过了各种试验考核。此项加工技术已经广泛推广到火箭发动机高强不锈钢、高温合金等难加工材料的零件加工中, 缩短了发动机零件生产周期。

参考文献:

[1] 耿国盛, 徐九华, 傅玉灿. 高速铣削近 α 钛合金的切削温度研究[J]. 机械科学与技术, 2006, 15(3): 229-332.

[2] 陈皓晖, 刘华明, 孙春华. 国内外叶轮数控加工发展现状[J]. 航天制造技术, 2002 (2): 45-48.

[3] 胡创国, 张定华, 任军学. 开式整体叶盘通道插铣粗加工技术的研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(2): 153-155.

[4] 单晨伟, 任军学, 张定华. 开式整体叶盘四坐标侧铣开槽粗加工轨迹规划[J]. 中国机械工程, 2007, 18(16): 1917-1920.

[5] 任军学, 张定华, 王增强. 整体叶盘数控加工技术研究[J]. 航空学报, 2004, 25(2): 205-208.

[6] 许祥泰, 刘艳芳. 数控实用加工技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[7] 张宪. 插铣法的特点与应用[J]. 工具展望, 2004 (4): 12.

[8] 丰飞. 用户宏程序在数控加工中的应用[J]. 新技术新工艺, 2006 (1): 41-43.

[9] 孙德茂. 插铣法挖腔用户宏程序的编程[J]. 模具工程, 2005 (10): 57-60.

[10] 王庭俊. 基于宏程序铣削椭圆台[J]. 机械制造与自动化, 2006 (3): 120-125.

(编辑: 王建喜)