

# 燃烧室内壁数字化加工技术研究

何卫东, 史 勇

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 针对火箭发动机燃烧室内壁型槽复杂、加工效率低和质量不稳定的难题, 利用加工中心数字仿真技术, 对加工中心整体装配建模, 进行数字化加工工艺过程整体仿真, 研究五轴棒铣刀加工技术, 革新了原有的螺旋槽片铣刀加工工艺方案, 提出薄壁螺旋槽燃烧室内壁零件加工中心高效加工工艺技术, 加工质量显著提高, 加工效率提高近 3 倍, 工艺改进后的零件经过装配热试车考核满足要求。

**关键词:** 燃烧室内壁; 数字化加工; 数字仿真; 加工效率

**中图分类号:** V463-34   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-9374 (2014) 02-0067-05

## Study on digitization machining of combustor inner wall

HE Wei-dong, SHI Yong

(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Since the complicated helical groove on the combustor inner wall of rocket engine decreases the machining efficiency greatly, the modeling of integral assembly in the machining center and the whole simulation for the digitization machining process were conducted by using digital simulation technology. A high-efficiency machining technical proposal for machining the helical grooves on the combustor inner wall is proposed. The five-axis stick milling cutter machining technology was adopted instead of the former helical groove milling cutter machining approach. Therefore, the machining quality was improved obviously and the machining efficiency was increased by nearly three times.

**Keywords:** combustor inner wall; digitization machining; digital simulation; machining efficiency

## 0 引言

液氧/煤油发动机推力大、无污染且可重复性使用, 具有广阔的发展和应用前景。燃烧室内壁

作为推力室重要部件之一, 其外表面分布着结构复杂的螺旋槽, 铣槽加工是零件加工的关键工序。由于该零件尺寸壁厚比大 (80 : 1), 材料为铜合金, 质地较软, 加工过程对变形控制的难度

收稿日期: 2013-11-15; 修回日期: 2014-03-09

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2010JY09)

作者简介: 何卫东 (1967—), 男, 高级工程师, 研究领域为数控加工技术

极大，是保证工艺质量和提高加工效率的关键。

传统工艺方法采用专用螺旋铣槽机进行片铣刀加工，刀具与毛坯体接触面积大，刀具容易产生振动，影响加工表面质量，出现表面振纹大的现象，粗糙度达不到要求；另外，此类零件加工周期长（大燃烧室内壁通常的加工周期为25~30天），周期性振动过于频繁会减小刀具连接刚度，严重的会引发掉刀，将零件扎伤，甚至报废。而借助于数字化加工技术，对加工中心转化技术可行性进行论证，结合高速加工技术和空间矢量五轴转化技术，提出薄壁螺旋槽燃烧室内壁零件加工中心高效加工工艺技术并成功应用。该方案使加工质量显著提高，加工效率提高近3倍。

### 1 燃烧室内壁数字化加工仿真技术

#### 1.1 燃烧室内壁零件及加工工艺方法

燃烧室内壁外形从上至下设计为3种螺旋升角的螺旋槽，槽宽为1~1.8 mm的变螺旋槽结构，总螺旋槽数达490多条，三维模型见图1和图2。

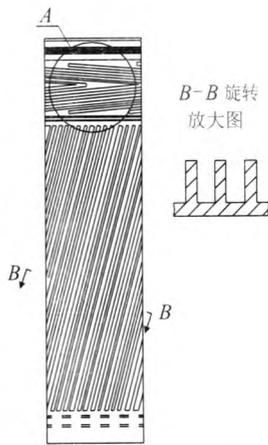


图1 燃烧室内壁模型

Fig. 1 Combustor inner wall model

燃烧室内壁一直采用专用片铣刀沿螺旋升角方向逐条螺旋槽加工，每加工一条螺旋槽后，分度头旋转固定角度进行下一个槽加工，最终实现完全加工。由于现有专用铣槽机固有分度误差缺陷，加工后经常出现整周槽不闭合现象，导致最后一条筋宽或大或小，难以满足设计要求；此外，由于螺旋槽加工过程中，片刀直径大，螺旋

上升过程会使刀具产生应力变形，引起槽侧残余应力大，完成加工后，应力释放会影响螺旋槽和筋的尺寸，经常需要返修才能满足设计要求。

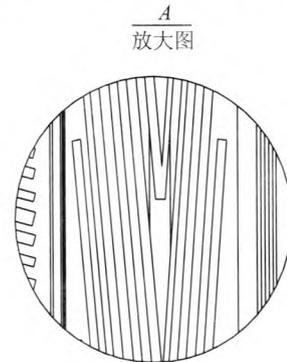


图2 局部槽视图

Fig. 2 Partial view of helical grooves

针对这些问题，引进了数字加工技术和五轴矢量转化技术。首先建立现有高速加工中心数字模型，然后在虚拟加工环境中装配毛坯进行加工试验，对其可加工性进行预测和评价，对加工后的残余应力进行分析计算，优化工艺参数，优化后的程序和加工参数直接应用于实际生产，提高产品快速响应的能力。

#### 1.2 燃烧室内壁数字加工机床简介

燃烧室内壁加工选用DMU100P五轴机床（行程1000×1000×1000 mm，西门子840D-SL系统）。各运动轴几何示意图如图3所示。

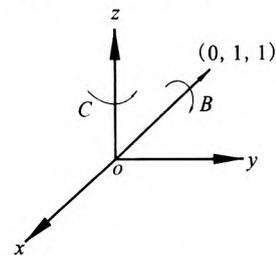


图3 DMU100P各运动轴几何示意图

Fig. 3 Geometric schematic diagram of each moving axis in DMU100P five-axis machine tool

机床为Table-Head型，两个旋转轴分别放在主轴和工作台上。工作台绕z轴旋转，为自由旋转轴无行程限制（±n·360°）；主轴整体绕yz面上的矢量（0，1，1）摆动，改变刀轴方向灵活，该摆动轴为非标旋转轴，摆角为-10°~180°。

### 1.3 加工中心数字模型建立

#### 1.3.1 机床物理模型装配

机床三维虚拟数字模型的建立是虚拟制造技术的基础。五轴数控加工机床各个运动部件相对运动状况比较复杂, 难以用传统的方法检查和控制, 而五轴机床三维虚拟数字模型建立的重点是面向机床各个运动部件的实际尺寸及空间装配位置关系, 使其能正确反映实际机床运动可能出现的碰撞和干涉等现象<sup>[1-3]</sup>。

机床三维虚拟数字模型建立设计流程如图 4 所示, 最终三维装配图见图 5。

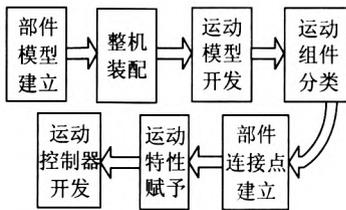


图 4 机床三维虚拟数字模型设计流程

Fig. 4 Design process of 3D virtual digital model for machine tool

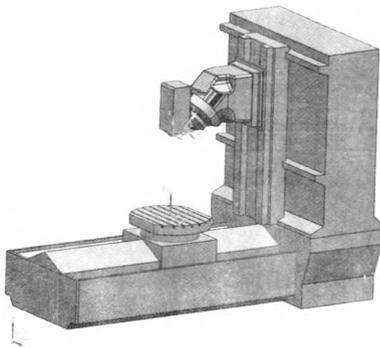


图 5 装配体三维模型

Fig. 5 Three-dimensional model of assembly

#### 1.3.2 机床模型运动算法

设工件坐标系为  $oxyz$ , 刀轴矢量可绕矢量  $(0, 1, 1)$  摆动实现主轴旋转角  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ ), 即刀轴由水平方位转至竖直方位, 相应地, 轴旋转角  $B$  ( $0 \leq B \leq 180^\circ$ ), 工件绕坐标轴  $z$  转动角  $C$  ( $0 \leq C < 360^\circ$ ), 工作台回转轴与  $z$  轴一致; 机床运动坐标系为  $orxyz$ , 刀心  $oc$  在工件坐标系中的位置为  $(p_x, p_y, p_z)$ ; 刀轴矢量  $a$  ( $a_x, a_y, a_z$ ) 为单位矢量, 在工件坐标系  $oxyz$  中的坐标为

$(u_x, u_y, u_z)$ 。根据以上已知条件, 计算机床的运动坐标值 (相对  $orxyz$  坐标系)  $x, y, z$  及相应的回转角度  $B$  和  $C$ 。角度换算坐标系见图 6。

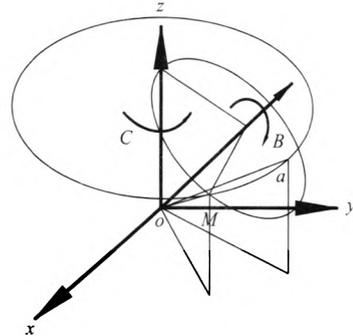


图 6 角度换算坐标系

Fig. 6 Angle conversion coordinate system

计算主轴绕矢量  $(0, 1, 1)$  的旋转锥曲线方程与工作台绕矢量  $(0, 0, 1)$  曲线旋转方程如下:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = 1 \\ y + z = 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = 1 \\ z = a_z \end{cases} \quad (2)$$

求旋转交点

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = 1 \\ y + z = 1 \\ z = a_z \end{cases} \quad (3)$$

(1), (2) 和 (3) 式联立, 得单位矢量旋转坐标

$$\begin{cases} x = \sqrt{(1 - y^2 - z^2)} \\ y = 1 - z \\ z = a_z \end{cases} \quad (4)$$

从而, 得到旋转矢量  $M(m_x, m_y, m_z) = (\sqrt{(1 - y^2 - z^2)}, 1 - z, a_z)$ , 旋转矢量  $M$  与矢量  $a$  在  $xy$  平面上的角为:

$$C = \arccos \left( \frac{m_x a_x + m_y a_y}{\sqrt{m_x^2 + m_y^2} \times \sqrt{a_x^2 + a_y^2}} \right) \quad (5)$$

由矢量  $M$ 、主轴旋转中心矢量  $N(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ ,

$\frac{1}{2}$ ) 及  $z$  向矢量  $(0, 0, 1)$  计算  $M$  至  $N$  及  $N$  至  $z$  向闭合矢量如下:

$$\begin{cases} MN(m_x, m_y - \frac{1}{2}, m_z - \frac{1}{2}) \\ ON(0, -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}) \end{cases} \quad (6)$$

从而有

$$B = \arccos\left(\frac{m_z - m_y}{\sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2} \times \sqrt{2}}\right) \quad (7)$$

根据方程  $xm_y = ym_x$ , 判断空间任一刀位矢量在平面上方或下方对旋转角度进行优化。

当  $xm_y \geq ym_x$  时:

$$C = 360^\circ - \arccos\left(\frac{m_x \times a_x + m_y \times a_y}{\sqrt{m_x^2 + m_y^2} \times \sqrt{a_x^2 + a_y^2}}\right) \quad (8)$$

当  $xm_y < ym_x$  时:

$$C = \arccos\left(\frac{m_x \times a_x + m_y \times a_y}{\sqrt{m_x^2 + m_y^2} \times \sqrt{a_x^2 + a_y^2}}\right) \quad (9)$$

由于加工中心 RTCP 功能, 根据文献 [3], 坐标点可以直接由刀位点输出。下面是该燃烧室内壁后置处理后生成的部分数控加工程序代码:

.....

N29x132.035y140.467z-337.809 B120.36 C-46.525

N30x129.213y142.916z-337.387 B121.97C-47.603

N31x126.272y145.379z-336.963B123.618C-48.711

N32x123.206y147.856z-336.537B125.306C-49.852

N33x120.005y150.343z-336.11B127.036C-51.026

.....

## 1.4 燃烧室内壁五轴加工刀路方案建立及仿真

### 1.4.1 五轴加工刀路方案分析过程

针对燃烧室内壁螺旋槽结构, 五轴加工过程采用刀具跟随筋侧的工艺方法逐层加工。通过对加工零件进行工艺分析, 制定如下工艺规划:

1) 坐标系的确定。根据设计基准与工艺基准统一的原则, 确定加工坐标系在小端端面上, 并且零件容易通过百分表进行找正。

2) 数控加工工序的规划。工序划分主要从加工精度和效率两个方面考虑, 利用加工中心高转速的功能, 开发小切深、大走刀及高转速的加工方案。

3) 刀具的选择。数控加工刀具选择的原则是安装调整方便, 刚性好, 耐用度和精度高。本零件加工选用两种棒铣刀 ( $\Phi 1.8$  mm,  $\Phi 1$  mm), 根据在稳定加工质量的基础上提高效率的原则, 尽可能选取大的棒铣刀加工大部分范围, 由较小刀具加工剩余部分。

4) 加工程序参数设置。采用 UG 软件进行多轴加工编程, 根据工艺要求进行切削参数的选择, 主要包括行距、公差、加工余量、进退刀方式选择、刀轴控制方式、连接方式及走刀路线等的设定。为了更好的保证筋厚度, 本研究方案采用侧刃加工法, 如图 7 所示。

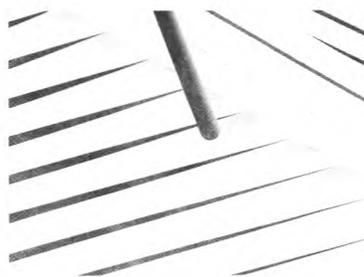


图 7 侧刃法加工螺旋槽刀路

Fig. 7 Cutting route for spiral groove machined by side milling cutter method

5) 生成刀具轨迹, 进行刀具轨迹检验。

6) 后置处理刀具轨迹转化成机床加工程序。

7) 通过 UG/CAM 进行机床仿真及分析。

### 1.4.2 加工中心仿真方案与实际加工对比

为了保证实际加工过程的稳定高效, 充分利用机床高性能, 需要对仿真方案反复论证, 并通过试验验证。首先利用计算机建立虚拟控制器, 在装配模型中进行零件虚拟加工, 模拟过程见图 8, 确定最佳理论加工参数; 然后将模拟加工参数应用于实际加工, 进行验证调整。

五轴仿真结果和实际加工结果对比见图 9。

由图 8 和图 9 可见, 加工中心五轴高效加工后的零件表面质量优于传统加工的零件表面质量, 表面基本无振纹, 表面粗糙度规格可以提高一倍, 基本无毛刺, 减少了后续钳工打磨工作量。这主要是由于加工时刀具与燃烧室内壁铜合金材料接触面减小, 刀具振动小, 且加工中心采

用国际先进的全闭环光栅尺, 零件尺寸精度高, 消除了传统加工方法带来的整周累计误差; 而且, 棒铣刀加工方式刀具侧面与槽侧面贴合加工, 刀具尺寸小, 残余应力小, 而传统片铣刀方

法在螺旋加工过程中由于片直径大会产生较大应力, 刀具易变形, 工件表面残余应力相应增大, 槽侧应力释放后, 尺寸精度也经常不满足要求。图 10 为燃烧室内壁加工后照片。

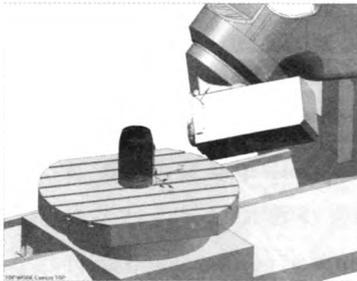


图 8 五轴加工过程

Fig. 8 Five-axis machining process

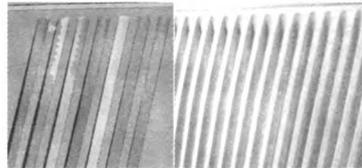


图 9 仿真结果和实际加工结果对比

Fig. 9 Comparison of simulation and actual machining results

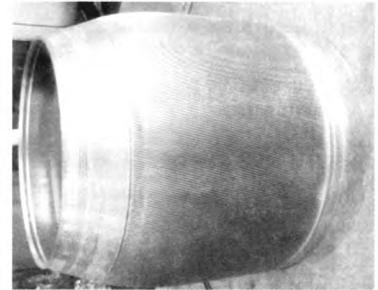


图 10 燃烧室内壁加工后照片

Fig. 10 Picture of finished combustor inner wall

## 2 燃烧室内壁高效加工技术实际应用

目前燃烧室内壁高效加工技术已经应用于燃烧室内壁生产, 表 1 为小型和大型燃烧室内壁不

同加工方式的效率对比。

对比可见, 现有加工中心高效加工方式刀具成本可节省 2/3, 单件加工时间减少 2/3, 总体生产效率提高 3 倍, 实现原短线产品的快速交付。

表 1 燃烧室内壁加工效率对比

Tab. 1 Comparison of machining efficiency of combustor inner wall

零件名称	加工方式	使用设备	刀具数量	夹具数量	单件平均加工时间	表面质量	合格率	生产效率
小燃烧室内壁	传统制造方式	专用铣槽机	折合成棒铣刀 8 把	相同	8-10 天	有振纹、毛刺大, 粗糙度 $Ra3.2\sim Ra6.3$	100%	
	数控转化方式	加工中心五轴高效加工	折合成棒铣刀 0.2 把		2-3 天	无振纹、毛刺小, 粗糙度 $Ra1.6\sim Ra3.2$	100% 表面质量优于传统方法	原加工方法的 3~4 倍
大燃烧室内壁	传统制造方式	专用铣槽机	折合成棒铣刀 30 把	相同	30 天	有振纹、毛刺大, 粗糙度 $Ra3.2\sim Ra6.3$	100%	
	数控转化方式	加工中心五轴高效加工	折合成棒铣刀 0.5 把		10 天	无振纹、毛刺小, 粗糙度 $Ra1.6\sim Ra3.2$	100% 表面质量优于传统方法	原加工方法的 3 倍

## 3 结论

通过运用数字化高效五轴加工技术, 针对火箭发动机燃烧室内壁加工提出五轴棒铣刀加工技术代替原有的螺旋槽片铣刀加工工艺方案, 对五轴加工过程中机床模型的运动坐标变换进行了理论推导, 分析了五轴加工刀路方案. 将提出的加工

工艺应用于两种燃烧室内壁的加工, 并对加工中心仿真方案过程与实际加工进行了对比。结果对比表明, 相对于传统的螺旋槽片铣刀加工工艺, 采用新型加工工艺刀具成本可节省 2/3, 单件加工时间减少 2/3, 总体生产效率提高 3 倍, 有效保证了航天短线产品的顺利交付。

(下转第 76 页)

合设计图纸要求。表明采用仿真软件 Pamstamp 进行回弹仿真计算对 Ti-15-3 材料弧板成型模具设计、制造和冲压工艺设计具有理论指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 段磊, 蔡玉俊, 莫国强, 等. 汽车覆盖件成形回弹仿真及模面优化研究[J]. 锻压技术, 2010, 35(2): 34-38.
- [2] 彭必有, 傅建. 冲压回弹仿真结果的工艺知识发现技术研究[J]. 锻压技术, 2009, 34(3): 33-36.
- [3] 陈剑鹤, 于云程. 冷冲压工艺与模具设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [4] 钟毓敏. 冲压工艺与模具设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [5] 李尚健. 金属塑性成形过程模拟[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [6] 卢险峰. 最优化方法应用基础[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003.
- [7] 李泷杲. 金属板料成形有限元模拟基础 -PAMSTAMP2G (Autostamp)[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [8] 王远钟, 董定福, 俞芙芳. 数值模拟波动压边力对拉深件成形质量的影响[J]. 塑性工程学报, 2005 (6): 46-50.
- [9] 武晓红. 日本冲压模具的技术特点[J]. 模具技术, 1999 (4): 48-50.
- [10] 肖景荣, 姜奎华. 冲压工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [11] 王孝培. 冲压手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [12] HYUN D I, OAK S M, KANG S S, et al. Estimation of hole flangeability for high strength steel plates[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002 (130-131): 9-13.
- [13] LIN S C, TSENG F, CHIENG C C. Numerical simulation of the stamping process through microchannels[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2003 (258): 179-185.

(编辑: 张永秀)

(上接第 71 页)

#### 参考文献:

- [1] 何永红. 壳体类高效数字化制造研究[J]. 航空精密制造技术, 2010 (2): 29-31.
- [2] 谢国明, 曾向阳, 王学平. UGCAM 实用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [3] 安杰, 邹显章. UG 后处理技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [4] 周济, 周艳红. 数控加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [5] 韩鸿莺, 张秀玲, 毕毓杰. 数控加工技师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [6] 郑联语, 汪叔淳. 薄壁零件数控加工工艺质量改进方法[J]. 航空学报, 2001, 22(5): 424-428.
- [7] 刘雄伟, 张定华. 数控加工理论与编程技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [8] 黄毓荣, 顾蕊. Unigraphics Solutions Inc UG 多轴铣制造过程培训教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [9] 张继红, 高佑芳, 王恩俊. 基于 CAM 的数控加工后置处理方法的研究与实践[J]. 机电产品开发与创新, 2007 (1): 188-189.
- [10] 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.

(编辑: 张永秀)