

# 刀具移距在诱导轮叶片加工中的作用

于 捷, 杜方平

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 通过数学方法, 推导出诱导轮铣加工叶片时刀具移距的计算公式, 解决了诱导轮叶片加工过程中产生根切、顶切的问题。以某型号发动机涡轮泵诱导轮为例, 给出了工艺流程和加工参数。加工出的产品经水力试验和地面热试车及飞行考验, 完全满足设计要求, 表明该工艺方法正确, 工艺参数可行有效。该工艺技术还可推广用于航空、航天以及民用涡轮泵诱导轮的加工领域。

**关键词:** 诱导轮; 刀具移距; 根切

**中图分类号:** V434-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2011) 04-0054-05

## Application of cutter travel distance in inducer blade milling

YU Jie, DU Fang-ping

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

**Abstract:** The calculation formula of cutter travel distance during inducer blade milling was derived by mathematic method. It solved the problems of undercutting and top-cutting in the process of inducer blade milling. Taking the inducer of turbopump in a certain space engine for example, the process flow and machining parameters of the inducer are presented. The product made with the proposed process and parameters was proved through hydraulic test, ground hot firing and flight mission. The results indicate that the product can completely satisfy the design requirements, and the proposed process and parameters are correct and effective. The process mentioned above can be adopted in turbopump inducer machining for aerospace and civil applications.

**Keywords:** inducer; cutter travel distance; undercutting

## 0 引言

诱导轮技术广泛应用于航空、航天以及民用涡轮泵中, 作用是提高涡轮泵的抗气蚀性能。采用诱导轮和离心轮组成的泵机组, 可使涡轮泵转

速大幅提高, 不仅减小了涡轮泵的尺寸和质量, 提高了涡轮泵的性能, 而且由于泵抗气蚀性能的提高, 涡轮泵可以在入口压力较低的情况下稳定可靠地工作。

气蚀是造成涡轮泵出现故障的重要原因之一。为了防止泵在工作过程中发生气蚀, 最有效

收稿日期: 2011-03-24; 修回日期: 2011-04-12

作者简介: 于捷 (1969—), 女, 高级工程师, 研究领域为涡轮泵机加和装配

的方法是在离心泵前增加一个诱导轮。诱导轮的抗气蚀性能体现在两个方面: 一是诱导轮作为与泵的进口装置直接相连的部件, 本身应具有良好的抗气蚀性能; 二是诱导轮能对进口液流进行预旋和预增压, 改善离心轮部分的进口条件, 增强离心轮的抗气蚀性能。

由于泵机组抗气蚀性能在一定程度上主要取决于诱导轮性能, 因此诱导轮的设计、加工尤为重要。诱导轮加工中的关键技术是叶片的铣削, 铣削叶片时, 刀具中心若与诱导轮轴线移距不当, 加工出的诱导轮叶片会产生根切、顶切现象, 降低诱导轮叶片强度, 影响泵的抗气蚀性能。所以, 有必要对诱导轮叶片加工中的刀具移距进行研究。

## 1 气蚀现象

气蚀现象是指在液体流动系统中, 当液体静压低于该处温度下液体的饱和蒸气压时, 液体将发生沸腾, 生成蒸气泡。如果这些气泡随液流流向高压区, 由于该处压力大大超过该温度下液体的饱和蒸气压, 这时气泡将产生剧烈的凝结, 气泡突然消失。液体的沸腾和蒸气泡的突然凝结均以很高的速度进行, 于是产生局部水击, 局部压力可达几十甚至几百兆帕, 水击的频率可以达到每秒几千次甚至几万次, 并伴随着振动和噪声。

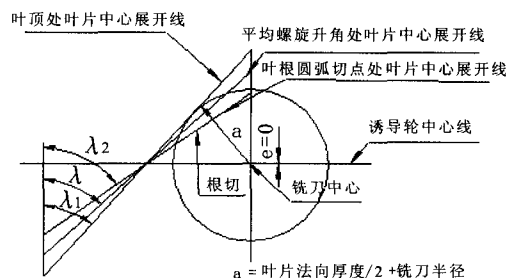
在离心泵中, 气蚀现象是在进口压力较低的情况下发生的, 虽然这时泵进口压力还大于该液体温度下的饱和蒸气压, 但由于液体流过叶片进口边缘时, 像流过任何型面一样会形成低压区, 对于离心泵, 当具有正攻角时, 其低压区发生在叶片进口部分的背面, 流速越大, 则静压越低, 在进口边上离轴线最远的点速度最大, 当该处静压低于推进剂温度下的饱和蒸气压时, 就会发生气蚀现象。在泵发生气蚀后, 离心轮表面受到局部水击, 一定时间后零件表面开始遭受破坏。当气蚀现象严重时, 会导致泵的振动加剧, 噪声增大, 泵的流量和扬程剧烈下降, 甚至有可能导致泵体结构遭受严重破坏<sup>[1]</sup>。

## 2 诱导轮型面加工中铣刀移距的研究

### 2.1 移距概念

诱导轮的叶片上窄下宽且根部有圆角, 整体形状呈螺旋结构。因此, 为使诱导轮加工出的型面、叶根圆角与设计图纸完全相符, 必须使铣刀相对于零件轴线有一个合适的移距, 移距过大或过小, 都会使加工出的叶片产生顶切或根切现象。

图 1 所示为左旋诱导轮当移距  $e=0$  时的情况:



$\lambda$ —平均螺旋升角;  $\lambda_1$ —叶尖处螺旋升角;  
 $\lambda_2$ —叶根处螺旋升角;  $e$ —铣刀移距;  
 $a$ —叶片法向厚度/2 + 铣刀半径

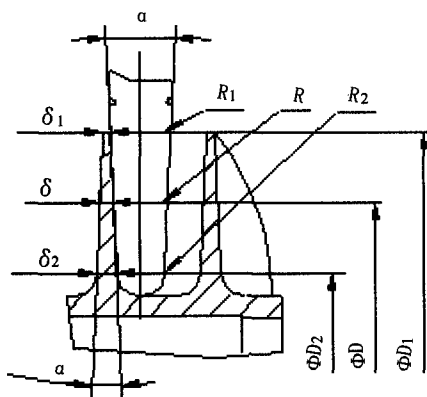
图 1 移距  $e=0$  时铣刀与诱导轮对应关系

Fig. 1 Correspondence between milling cutter and inducer as  $e=0$

如图 1 所示, 在  $e=0$  时, 铣刀若铣到叶顶处时, 叶片其它部位, 尤其是叶根处已经铣到一部分叶型, 即发生根切现象。同理, 当移距  $e$  过大时, 将发生顶切现象。诱导轮加工中产生根切和顶切现象后, 诱导轮叶片强度和抗气蚀性能将大幅降低。

### 2.2 移距的确定

理论上讲, 必须将刀具移到叶片的法向平面上, 才能加工出完全符合图样要求的叶形, 即让叶顶与叶根处的螺旋线与刀具同时相切, 也就是说, 移距的大小与诱导轮的结构参数相关, 铣加工诱导轮叶片时, 铣刀与零件的对应关系见图 2 所示。



$\Phi D_1$ —诱导轮外径； $\Phi D_2$ —诱导轮叶片型面与叶根圆弧切点处直径； $\Phi D$ —诱导轮平均螺旋升角处直径； $\delta_1$ —全叶片叶尖法向厚度； $\delta_2$ —全叶片叶根圆弧切点处法向厚度； $\delta$ —全叶片平均螺旋升角处法向厚度； $\alpha$ —叶片与刀具锥角； $R$ —叶片平均螺旋升角处铣刀半径； $R_1$ —叶尖处铣刀半径； $R_2$ —叶片型面与叶根圆弧切点处铣刀半径

图2 铣刀与诱导轮对应关系

Fig. 2 Correspondence between milling cutter and inducer

诱导轮按导程不同，可分为等螺距诱导轮和变螺距诱导轮。

### 2.2.1 等螺距诱导轮刀具移距的确定

如图3所示，为了使加工出的叶片不产生根切或顶切现象，必须让叶顶处和叶根处的螺旋线与刀具共同相切。

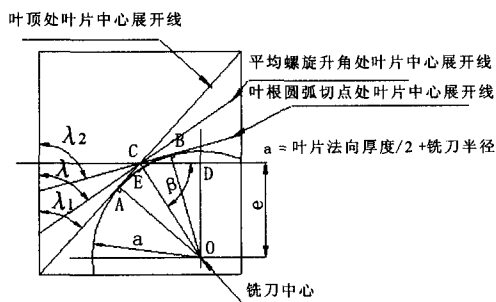


图3 铣刀与诱导轮的位置关系

Fig. 3 Positions of milling cutter and inducer

移距计算公式的推导：

如图3所示，在三角形 $\triangle OCD$ 中

$$e = OC \sin \angle \beta \quad (1)$$

$$\angle \beta = \angle OCB - \angle DCB$$

$$= \frac{180^\circ - \lambda_1 + \lambda_2}{2} - (90^\circ - \lambda_1) = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \quad (2)$$

$$OC \approx OA = OB = \left( R + \frac{\delta}{2} \right) \quad (3)$$

螺旋升角的计算公式：

$$\tan \lambda = \frac{S}{\pi D} \quad (4)$$

式中： $S$ 为诱导轮导程。

将式(2),(3),(4)代入式(1)中，得出刀具移距的计算公式：

$$e = \left( R + \frac{\delta}{2} \right) \sin \frac{1}{2} \left( \tan^{-1} \frac{S}{\pi D_1} + \tan^{-1} \frac{S}{\pi D_2} \right) \quad (5)$$

### 2.2.2 变螺距诱导轮刀具移距的确定

对于变螺距诱导轮，根据设计给出的导程等特性参数，按等螺距诱导轮移距的计算方法，计算出每个程序段的铣刀移距值 $e$ ，再求得增量 $\Delta e$ 即可。

移距值得出后，根据诱导轮需要铣削的叶片是工作面或非工作面，将移距前面加 $\pm$ 符号。

## 3 诱导轮加工工艺流程

诱导轮加工工序安排的原则为：零件的热处理工序应安排在粗车和精车之间，铣键槽工序应安排在加工叶片之前，动平衡工序最后完成。诱导轮加工工艺流程如图4所示。

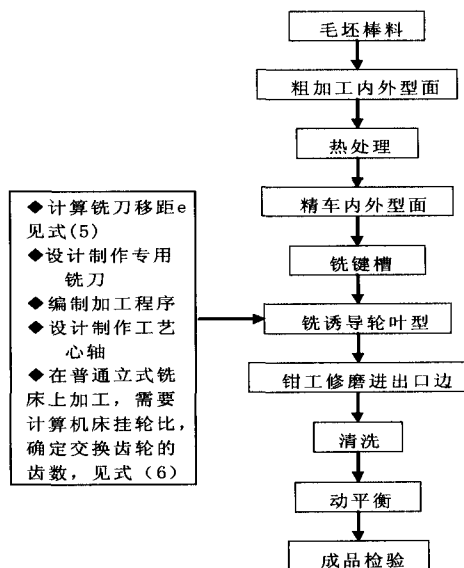


图4 诱导轮加工工艺流程

Fig. 4 Flow chart of inducer processing technic

诱导轮是由棒料或锻件切削加工制成的。主要加工部位是叶片型面, 一般采用铣削的方法在立式铣床或数控加工中心上完成, 铣加工诱导轮前, 应设计制作专用装夹心轴和专用铣刀, 确保加工出的诱导轮型面与叶根圆角与设计图纸完全相符。在普通立铣床上加工诱导轮时, 需要根据诱导轮导程, 铣床丝杠螺距和分度头定数计算挂轮比, 确定交换齿轮的齿数, 挂轮比  $i$  的计算方法如下<sup>[2]</sup>:

$$i=\frac{Z_1}{Z_2}\times\frac{Z_3}{Z_4}=\frac{40\times6}{S}$$

(6)

$Z_1, Z_2, Z_3$  和  $Z_4$  为 4 个交换齿轮的齿数; 40 为分度头的定数; 6 为丝杠螺距;  $S$  为诱导轮的导程。

根据上式计算出来的齿轮齿数应是机床常用的齿轮。

4 某型号涡轮泵诱导轮的加工

在某型号液体火箭发动机涡轮泵研制中, 诱导轮为等螺距诱导轮, 与其它型号涡轮泵的诱导轮相比较, 其导程小、叶片薄、刚性较差, 为保证叶片加工强度, 防止顶切或根切, 加工难度更大。诱导轮的加工流程按图 4 所示流程进行, 叶片的铣削在数控加工中心上进行, 根据产品结构设计制作了专用刀具, 根据诱导轮及专用铣刀尺寸, 按公式 (5) 计算得出了铣刀中心与诱导轮轴线移距为 0.91 mm, 铣削叶片加工工艺参数见表 1。

按表 1 所述的工艺参数加工出的诱导轮, 尺寸检测结果与设计图纸尺寸完全相符, 检测结果见表 2。

表 1 加工中心铣叶型工艺参数  
Tab. 1 Blade milling parameters of machining center

项目	诱导轮导程 $S/\text{mm}$	诱导轮旋向	叶片数	叶片法向 厚度/ $\text{mm}$	诱导轮叶 片高度/ $\text{mm}$	铣刀端头圆 弧半径/ $\text{mm}$	铣刀锥角 $\alpha/(\text{^\circ})$	铣刀移距 $e/\text{mm}$
参数值	$27\pm0.2$	左旋	2	$1^{+0.1}_0$	26	5	5	0.91

表 2 诱导轮加工后检测结果  
Tab. 2 Inspection results of inducer machined with proposed process and parameters

项目	诱导轮导程 $S/\text{mm}$	叶片法向厚度/ $\text{mm}$	叶根半径/ $\text{mm}$	叶片锥角 $\alpha/(\text{^\circ})$	轮毂直径 $\Phi/\text{mm}$
设计要求	$27\pm0.2$	$1^{+0.1}_0$	$5\pm0.1$	$5\pm0.3$	$38\pm0.2$
实际加工结果	27.02	1.06	5.05	5.15	38.1

表 3 涡轮泵参加水力试验结果  
Tab. 3 Results of hydraulic test for turbopump

项目	功率/ $\text{kW}$	气蚀扬程/ $\text{m}$	扬程/ $\text{m}$	效率
设计要求	$200\pm5$	$10\pm1$	$650\pm50$	$65\%\pm10\%$
试验结果	202	10.3	670	67%

产品参加水力试验考核,各项参数测试均满足设计要求,试验结果见表3。产品最终通过了地面热试车考核。

## 5 结束语

本文所述的加工诱导轮时铣刀的移距计算公式和加工方法,已在科研生产中得到了应用,经过涡轮泵水力试验和发动机地面热试车及飞行考验成功,产品和工艺方法得到了验证,由此表明该工艺方法正确、可靠,可推广应用于航空、航天以及民用涡轮泵诱导轮的加工之中。

### 参考文献:

- [1] 朱宁昌,董锡鉴,马贻侯,等.液体火箭发动机设计[M].北京:宇航出版社,1994.

- [2] 黄春峰,赖传兴,陈树全.现代特种加工技术的发展[J].航空精密制造技术,2001(6):14-20.  
[3] 伊克敏,朱元,林中岳,等.发动机制造技术[M].北京:宇航出版社,1991.  
[4] 关醒凡.现代泵技术手册[M].北京:宇航出版社,1996.  
[5] 李华.机械制造技术[M].北京:高等教育出版社,2000.  
[6] 关醒凡.泵的理论与设计[M].北京:机械工业出版社,1987.  
[7] 郑修本.机械制造工艺学[M].北京:机械工业出版社,1999.  
[8] 丁希宁,梁武科.等螺距诱导轮的理论分析与数值模拟[J].甘肃:机械研究与应用,2009(1):41-43.  
[9] 郭晓梅,李增芳,王铁流,等.基于Pro/E诱导轮三维造型的研究与应用[J].黑龙江:煤矿机械,2009(3):174-176.  
[10] 郭晓梅.污水泵CAD、三维造型及流场分析一体化[D].镇江:江苏大学,2002.

(编辑:王建喜)

(上接第34页)

(3) 完善用于高速流动反应流的湍流模型,来模拟湍流流场和正确的耦合湍流对化学反应及化学反应对湍流的影响;

(4) 通过对超燃燃烧室的分析来系统地减少化学动力学模型中的反应式的个数,从而降低对计算机的要求。

### 参考文献:

- [1] 张蒙正,张忠利,葛李虎,仲伟聪.一体化超燃冲压发动机初步设计计算模型[J].火箭推进,2005,31(1):16-22.  
[2] HEISER W H, PRATT D T, DELEY D H. Hypersonic airbreathing propulsion[M]. Washington, DC: AIAA, 1994: 334-370.

- [3] YU G, LI J G, ZHAO J R, et al. Experimental studies on  $H_2$ /air model scramjet combustor, AIAA 99-2449[R]. US: AIAA, 1999.  
[4] 西工大、南航、北航三校合编.气体动力学基础[M].北京:国防工业出版社,1980.  
[5] A H 夏皮罗(美).可压缩流的动力学与热力学[M].陈立子译.北京:科学出版社,1966.  
[6] 李大鹏.煤油双模态冲压燃烧室工作过程研究[D].长沙:国防科学技术大学,2006.  
[7] 张鹏,俞刚.超燃燃烧室一维流场分析模型的研究[J].流体力学实验与测量,2003,17(1):88-92.  
[8] OBRIEN Timothy F, STARKEY Ryan P, LEWIS M J. Quasi-one-dimensional high-speed engine model with finite-rate chemistry [J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(6): 1366-1374.

(编辑:陈红霞)