

用于发动机涡轮盘叶片加工的夹具设计

许 静, 王 鹏

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘 要: 介绍了用于加工发动机涡轮盘叶片夹具的设计准则, 并给出了采用矢量三角函数和 VC 软件计算夹具极限偏差的公式及其判别依据, 采用该准则设计的夹具用于涡轮盘叶片加工, 产品满足设计要求, 并通过了发动机热试车考核。

关键词: 涡轮盘叶片; 矢量法; 三角函数法

中图分类号: V431-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 01-0065-07

Design of fixture for processing turbine tray vanes in rocket engine

XU Jing, WANG Peng

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

Abstract: The design criteria of the fixture applied for processing the vanes of the turbine tray in rocket engine are introduced in this paper. The distinguishing basis and formula to calculate the fixture limit deviation with vector trigonometric function methods and VC software are offered. The fixture designed with the criteria can meet the design requirements for processing the vanes of turbine tray, and was checked up by hot test run of rocket engine.

Keywords: turbine tray vane; vector computational method; trigonometric function method

0 引言

液体火箭发动机是运载火箭的重要组成部分, 涡轮盘是液体火箭发动机的关键部件之一。液体发动机涡轮盘结构具有以下特点: 轮盘带叶冠、型腔半封闭; 轮盘叶片弯曲、扭转、变截

面; 轮盘流道狭窄、结构复杂; 轮盘由高温合金整体坯料加工成型; 叶片栅距小等。涡轮盘叶片加工精度要求很高, 我厂是采用通用型电火花机床加工的, 要加工出满足设计要求的航天发动机涡轮盘叶片, 就必须设计出高精密的加工夹具。

传统夹具设计一般是根据经验设计的。本文采用先进的设计理念——虚拟设计方法进行夹具

收稿日期: 2012-06-01; 修回日期: 2012-08-16

作者简介: 许静 (1986—), 男, 助理工程师, 研究领域为液体火箭发动机工艺装备和非标准设备设计研究

设计。其核心设计思想是在设计出夹具后，首先计算出该夹具的理论栅距极限偏差；其次根据判别准则判定该夹具用于涡轮盘叶片加工是否可满足设计要求。若满足设计要求，则用于涡轮盘叶片加工；若不满足设计要求，则依据设计准则对夹具进行再优化设计。最后，再重复上述步骤，直至满足设计要求。该设计理念和方法用于生产，对大型工装夹具设计、生产和产品加工具有重要意义，既可提高生产效率，还可节约生产成本。

1 涡轮盘设计要求

液体火箭发动机发生器中氧化剂和燃料混合燃烧，产生高温高压燃气，通过管路高速喷射到涡轮盘叶片上，推动涡轮盘高速转动；涡轮盘将动力传递给轴，推动氧泵和燃料泵工作。发动机氧泵和燃料泵涡轮盘叶片均采用电火花成型加工。涡轮盘属于盘状类零件，主要由内孔、轮盘、叶片及叶冠等组成，如图 1 所示。涡轮盘设计要求见表 1。其中叶片栅距精度 D 是靠夹具保证的。

表 1 涡轮盘设计要求
Tab. 1 Design requirements of turbine tray

材料	内孔直径(M)	外圆直径(N)	叶片栅距精度(P)	mm	
				垂直度精度(Q)	叶片数量(n)
模锻件 GH4169 锻件 1Cr18Ni9Ti	$\phi 20-\phi 300$	$\phi 50-\phi 1\,000$	± 0.15 其中 5% 允许 ± 0.25	0.02	10~300

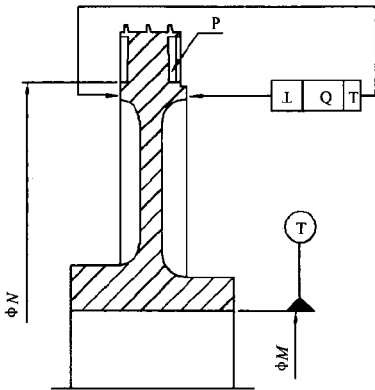


图 1 涡轮盘结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of turbine tray

2 夹具设计

用于涡轮盘电火花加工的夹具结构如图 2 所示。它由主轴、分度盘、定位器、轴承座、底板及辅助支架等组成。主轴通过 2 个轴承支撑起来，左边安装工件（涡轮盘），右边为分度盘，手拉式定位器安装在辅助支架上，工作时定位器上的插销插入分度盘上的定位孔内对工件定位，插销采用圆锥插销，可消除插销和分度盘定位孔间

的配合间隙。分度盘上的定位孔用精密机床加工，可获得高精度的位置度，采用该结构可将分度盘上定位孔的精确位置度映射到涡轮盘上，且其重复定位精度较高。

涡轮盘电火花加工夹具的尺寸及其精度要求（见图 2）：

分度盘上定位孔的位置度 $A_3=0.3\times$ 叶片栅距偏差；

主轴 H 面对 J 面的同轴度 $=0.01$ （根据机加工工艺水平和经济性来确定）；

旋转中心 O-O 与底面 K 的平行度=面 K 与面 V 的平行度+轴承座底面与轴承孔中心线的平行度+主轴 H 对 J 面的同轴度;

主轴 S 面对转动中心 O-O 的跳动量=叶片垂直度。

根据涡轮盘设计要求、经验、机加工工艺水平和经济性指标, 夹具设计的形位公差见表 2。

夹具设计的流程图如图 3。在夹具设计过程中, 要考虑的因素有: 电火花加工机床的性能指标、涡轮盘大小及加工空间尺寸要求等。

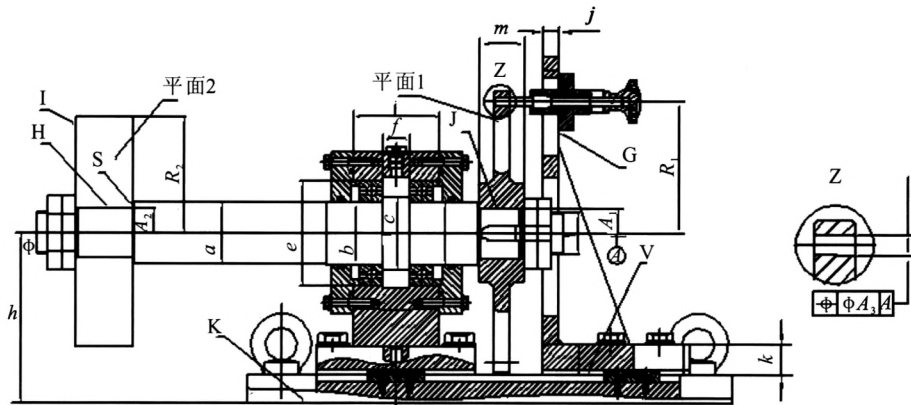


图 2 涡轮盘电火花加工夹具结构及其尺寸图

Fig. 2 Structure and design dimension of electrical processing fixture for turbine tray

表 2 夹具设计的形位公差

Tab. 2 Form and position tolerance in fixture design

其他设计要求	主轴 S 面对转动中心 O-O 的跳动量	主轴 H 面对 J 面的同轴度	旋转中心 O-O 与底面 K 的平行度	分度盘定位孔位置度 (A ₃)
设计精度	0.02	φ0.01	0.03	φ0.05

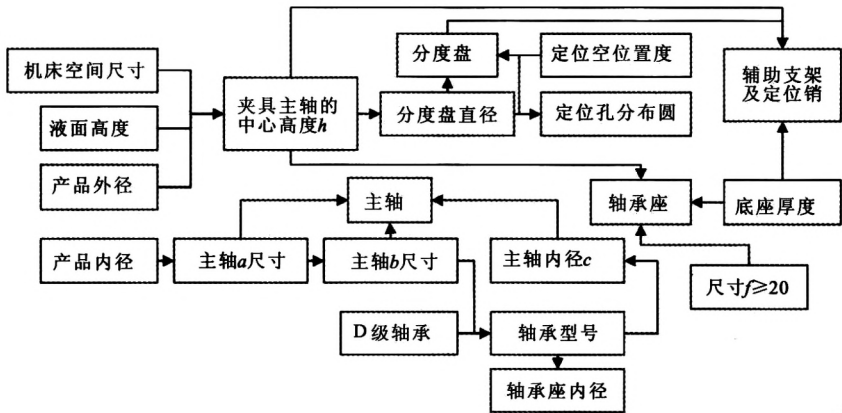


图 3 夹具设计主要关系图

Fig. 3 Main flow chart of fixture design

夹具设计准则:

1) 加工涡轮盘叶片时, 要求被加工的叶片浸在煤油中, 且涡轮盘的顶部距液面的高度为

20~30 mm。而涡轮盘的直径 R_1 已知, 那么夹具主轴的旋转中心距工作台的距离 h 即可确定。

2) 主轴、轴承座、分度盘的主要尺寸及公

差要求由表 3 确定, 结构见图 2。

3) 涡轮盘叶片加工夹具属于精密级的辅助加工设备, 轴承选用 D 级轴承。根据 GB276-82 确定轴承的具体型号。

4) 2 个轴承之间的间距 f 可以根据空间结构及轴的总体尺寸确定, $f \geq 20$ 。在轴承座的顶部设计有加油嘴, 用于添加润滑油。底部设计有键槽用于粗定位。

5) 为了防止铁屑进入腔内, 在轴承端盖的内孔上设计有密封槽, 用毛毡密封, 尺寸按照 JB/ZQ4606-86 标准设计。

6) 辅助支架在竖直方向上设计有矩形孔, 用于手拉式定位器调整上下位置, 适应分度盘上定位孔的径向方向位置。底面上设计定位孔, 夹

具经过调校后在底板和辅助支架上打定位销, 锁定相对位置。

7) 底座的结构及其主要尺寸见图 2。底座的上面设计有键槽, 用于粗定位。在底座上要设计起吊螺钉。

8) 底板的上表面和轴承座及其辅助支架的下表面设计有键槽, 它们之间用键定位, 目的是用于粗定位, 方便钳工装配和找正。按照设计要求, 夹具调校后在底板和轴承座上打定位销, 锁定相对位置。

9) 将手拉式定位器放置在辅助支架的上部, 方便操作。

10) 固定涡轮盘和分度盘各使用两个圆螺母, 第一个圆螺母用于固定, 第二个圆螺母用于防松。

表 3 零组件尺寸公差确定原则

Tab. 3 Determination principle for dimensional tolerance of parts

主要尺寸	确定原则	精度
R_1	分度盘定位孔分布圆半径	自由公差
R_2	涡轮盘叶片半径	
A_1	分度盘内孔半径	h5
A_2	涡轮盘半径	
A_3	分度盘定位孔的位置度	h5
a	$a \geq A_2 + 10 \sim 8, a < b$	h7
b	$b =$ 轴承内孔直径	h5
c	c 由 GB276-82 确定	h7
d	$d = c - (2 \sim 3), b$ 为螺纹直径	h5
e	$e =$ 轴承外径	H6
f	$f \geq 20$	H6
h	旋转中心高度	自由公差
i	$i = f + 2 \times$ 轴承宽	自由公差
j	$j = 10$	自由公差
k	$k = 20$	自由公差
m	$m \geq 30$	自由公差
n	$n =$ 叶片个数	无

3 夹具的理论栅距极限偏差与判定准则

3.1 夹具的理论栅距极限偏差计算

影响涡轮盘叶片加工夹具理论栅距极限偏差

的因素:

- 1) 分度盘定位孔加工分度圆的半径 R_1 ;
- 2) 涡轮盘叶片的半径 R_2 ;
- 3) 分度盘内孔与主轴的配合精度 G_1 ;
- 4) 涡轮盘内孔与主轴的配合精度 G_2 ;

5) 分度盘上定位孔的位置度 A_3 。

夹具理论栅距极限偏差是指使用夹具加工涡轮盘叶片在栅距上产生的最大误差。夹具精度极

限偏差在平面 1 和平面 2 内进行(见图 2)。平面 1 在分度盘所在平面上, 如图 4(a)所示; 平面 2 在涡轮盘所在平面上, 如图 4(b)所示。

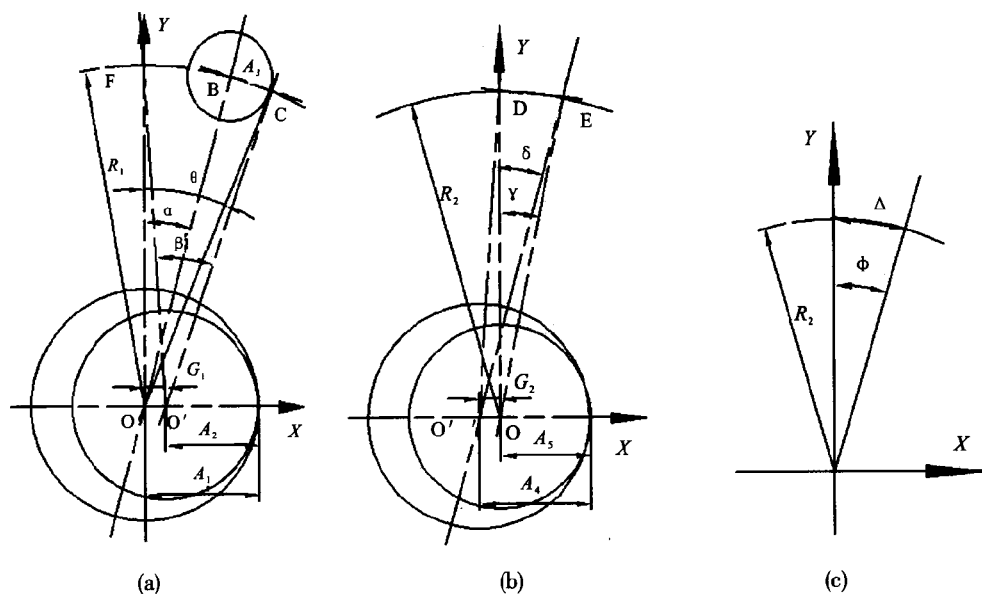


图 4 平面 1、平面 2 内的尺寸链图和叶片栅距极限偏差

Fig. 4 Dimensional chain diagrams in the first and second planes and limit deviation of turbine tray vane

3.1.1 夹具理论栅距极限偏差 Δ_{\max}

$$\Delta_{\max} = 2 R_2 \sin \frac{\varphi_{\max}}{2}$$

$$\varphi_{\max} = |\lambda_{1\max}| + |\lambda_{2\max}| \quad (1)$$

3.1.2 分度盘旋转产生的极限角度偏差 $\lambda_{1\max}$

在平面 1 内求解分度盘旋转产生的极限角度偏差 $\lambda_{1\max}$ 。

在平面 1 内, 如图 4(a)所示: A_1 为分度盘

内孔半径尺寸; A_2 为主轴半径尺寸; A_3 为分度盘上定位孔加工分度圆的位置精度; G_1 为过渡尺寸, 表征分度盘与主轴的配合精度, $G_1 = A_1 - A_2$; R_1 为分度盘定位孔加工分度圆的半径; α 为分度盘上理想的分度角度; β 为分度盘上考虑加工精度的分度精度; λ_1 为分度盘旋转产生的极限角度偏差。

由矢量计算法和三角函数法, 可求解得:

$$\lambda_{1\max} = \arccos \frac{\overrightarrow{O'F} \times \overrightarrow{O'C}}{|\overrightarrow{O'F}| \times |\overrightarrow{O'C}|} - \alpha$$

$$= \arccos \frac{-G_1 R_1 \sin \theta + G_1^2 + R_1^2 \cos \theta}{\sqrt{(G_1^2 + R_1^2) \times ((R_1 \sin \theta - G_1)^2 + (R_1 \cos \theta)^2)}} - \frac{2\pi}{n} \quad (2)$$

因为弧长 FC 相同, 且 $OC > O'C$, 所以 $\angle FOC < \angle FO'C$, 即为正值。

3.1.3 涡轮盘旋转产生的极限分度偏差 $\lambda_{2\max}$

在平面 2 内求解涡轮盘旋转产生的极限分度偏差 $\lambda_{2\max}$, 如图 4(b)所示。

在平面 2 内: R_2 为涡轮盘叶片的半径尺寸;

A_4 为涡轮盘内孔半径尺寸; A_5 为主轴半径尺寸; G_2 为过渡尺寸, 表征涡轮盘与主轴的配合精度, $G_2 = A_4 - A_5$; γ 为分度盘上理想的分度角度; δ 为主轴旋转的角度; λ_2 为涡轮盘相对主轴旋转产生的极限角度偏差。

由矢量计算法和三角函数法可求解得:

$$\lambda_{2\max} = \arccos \frac{G_2 R_2 \sin \frac{2\pi}{n} + G_2^2 + R_2^2 \cos \frac{2\pi}{n}}{(G_2^2 + R_2^2) \times \left(\left(R_2 \sin \frac{2\pi}{n} + G_2 \right)^2 + \left(R_2 \cos \frac{2\pi}{n} \right)^2 \right)} - \frac{2\pi}{n} \quad (3)$$

因弧长 DE 相同, 且 $O''E > OE$, 所以 $\angle DO''E < \angle DOE$, $\lambda_{2\max}$ 为负值。涡轮盘与分度盘旋转产生的极限分度偏差相互独立。

3.1.4 夹具的理论栅距极限偏差 Δ_{\max} 计算

根据公式(1)~公式(3), 求解得出夹具理论角度极限偏差:

$$\varphi_{\max} = \arccos \frac{-G_1 R_1 \sin \theta + G_1^2 + R_1^2 \cos \theta}{\sqrt{(G_1^2 + R_1^2) \times ((R_1 \sin \theta - G_1)^2 + (R_1 \cos \theta)^2)}} - \arccos \frac{G_2 R_2 \sin \frac{2\pi}{n} + G_2^2 + R_2^2 \cos \frac{2\pi}{n}}{\sqrt{(G_2^2 + R_2^2) \times \left(\left(R_2 \sin \frac{2\pi}{n} + G_2 \right)^2 + \left(R_2 \cos \frac{2\pi}{n} \right)^2 \right)}} \quad (4)$$

其中

$$\theta = \frac{2\pi}{n} + 2 \arcsin \frac{A_3}{2R_1}$$

通过三角函数法在图 4(c)中求解出涡轮盘叶片栅距极限偏差:

$$\Delta_{\max} = 2 R_2 \sin \frac{\varphi_{\max}}{2} \quad (5)$$

3.1.5 夹具理论栅距极限偏差计算程序设计

夹具理论栅距极限偏差根据计算公式(4)和公式(5), 采用 VC 编制程序计算, 界面见图 5。

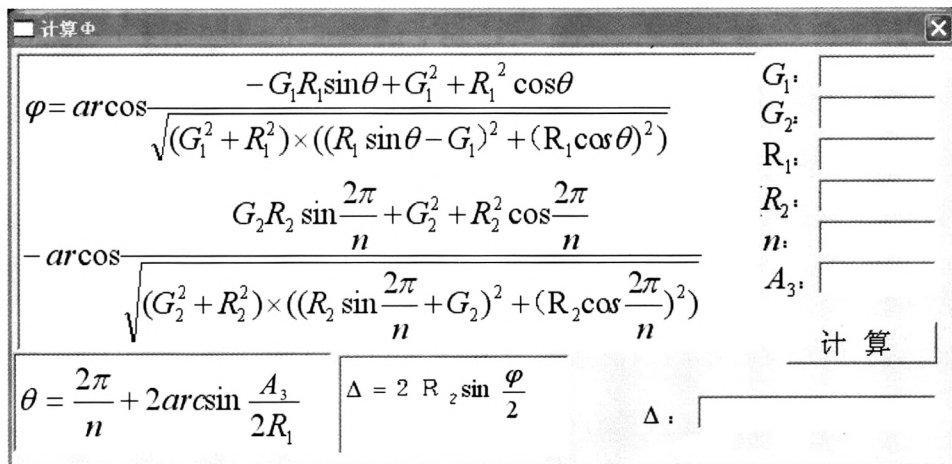


图 5 极限偏差 VC 算法与界面

Fig. 5 VC algorithm and window of limit deviation

运用该计算程序, 通过输入各参数值, 即可计算出夹具的理论栅距极限偏差。通过改变输入参数, 可以对计算得出的结果进行比较分析, 从而用于优化涡轮盘叶片加工夹具的设计, 最终保证涡轮盘叶片的加工精度。

3.2 夹具精度判别依据

根据夹具设计精度校核计算方法, 判断夹具

设计精度是否合格的依据是设计误差 inequality:

$$\delta_{g-A} + \delta_{j-A} + \delta_x + \delta_t \leq \delta_g$$

其中

$$\delta_{g-A} = \delta_d + \delta_{jb}$$

$$\delta_{j-A} = \delta_{Ap} + \delta_{A-d}$$

式中: δ_{g-A} 为工件安装误差; δ_{j-A} 为夹具安装误差;

δ_x 为导向误差; δ_f 为加工方法误差; δ_g 为工件加工误差; δ_d 为工件定位误差; δ_{jb} 为基准不重合误差; δ_{Ap} 为夹具安装面与机床安装面的配合引起的误差; δ_{A-d} 为夹具安装面与定位面的位置误差。

工件加工误差的分配原则为:

$$\delta_{g-A} \leq 1/3\delta_g \tag{6}$$

$$\delta_{j-A} + \delta_x \leq 1/3\delta_g \tag{7}$$

$$\delta_f \leq 1/3\delta_g \tag{8}$$

δ_{g-A} 工件安装误差由设计生产和装配保证, 每年要进行精度校核; δ_{j-A} 夹具安装误差和 δ_x 导向误差由工人在机床上安装时决定。 δ_f 加工方法

误差与加工方法有关, 与夹具设计无关。

误差不等式的数目应等于工序尺寸的数目 (包括技术要求或位置要求)。只有各个误差不等式均满足要求, 夹具的设计精度才能满足工件的加工精度要求。否则, 应重新修正有关设计参数。涡轮盘电火花加工夹具的设计误差要小于叶片的加工分度误差的三分之一。

4 夹具的理论栅距极限偏差判别

涡轮盘作为火箭发动机的关键件, 涡轮盘叶片的尺寸和公差要求非常严, 某型号涡轮盘的叶片具体尺寸和公差要求如表 4 所示。

表 4 涡轮盘叶片的设计要求
Tab. 4 Design requirements of turbine tray vane

材料	内孔直径(M)	外圆直径(N)	叶片栅距精度(P)	垂直度精度(Q)	叶片数量(n)
模锻件 GH4169	φ216	φ360	±0.15 其中 5%允许±0.25	0.02	180

某型号涡轮盘电火花加工夹具的参数为:
 $R_1=230$, $R_2=180$, $G_1=A_1-A_2=0.027$, $G_2=A_2-A_3=0.03$, $A_3=0.05$, $n=180$ 。

通过计算程序可求解夹具理论栅距极限偏差:

$$\Delta_{max} = 2 R_2 \sin \frac{\varphi_{max}}{2} = 0.0392 \tag{9}$$

理论栅距极限偏差与设计精度比较:

$$\Delta_{max} = 0.0392 \leq \frac{1}{3} \times 0.15 \tag{10}$$

理论栅距极限偏差满足设计要求。

5 叶片设计精度与实际加工精度的比较

涡轮盘叶片的加工工艺过程见图 6。加工出的产品经过计量部门检定, 叶片设计具体测量结果见表 5。从表 5 中可以看出加工出的叶片栅距精度 ≤ 0.15 , 满足产品设计要求。

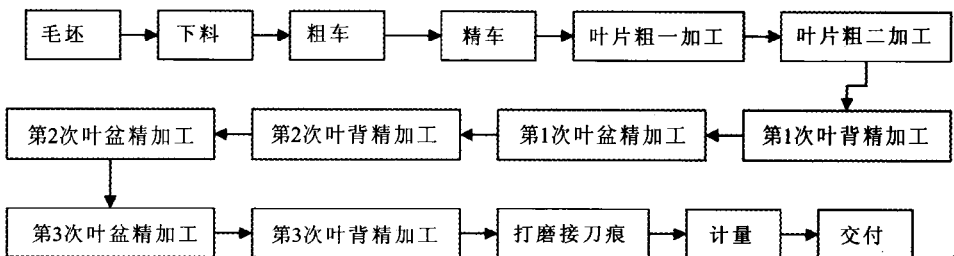


图 6 涡轮盘叶片的加工工艺过程
Fig. 6 Technical processing of turbine tray vane

(下转第 83 页)

参考文献:

[1] 魏大勇, 李明东, 刘星期, 等. GSB-W7 型 600kW 级大功率高速泵研制[J]. 化工管道与设备, 2010, 47(2): 24-25.
[2] 黄勇辉. Sundyne 高速泵的振动故障与原因分析[J]. 石油化工技术与经济, 2011, 27(3): 45-48.
[3] 吴云溪. 6HDS-152 型离心化工泵机组的振动故障诊断及维修[J]. 水泵技术, 2010 (2): 44-46.
[4] 张春梅, 王尚锦, 张太镒, 等. 时频分析在旋转机械状态监测及故障诊断中的应用[J]. 工程热物理学报, 2002, 23 (2): 187-189.
[5] 游磊, 方方, 李平勇, 等. 轴流泵振动加速度状态监测诊断系统的设计[J]. 四川大学学报(工程科学版),

2011, 43(Supp.1): 236-239.
[6] Bently Nevada, Corporation. 3300XL proximity transducer system manual[M]. US: Bently Nevada, Corporation, 1999.
[7] Bently Nevada, Corporation. 3500/42 proximitor/seismic monitor module operation and maintenance manual [M]. US: Bently Nevada Corporation, 2004.
[8] 郑月珍. 旋转机械振动监测和分析[J]. 燃气轮机技术, 2010, 23(1): 39-44.
[9] 杨建刚. 旋转机械振动分析与工程应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
[10] American Petroleum Institute. Centrifugal pumps for petroleum, petrochemical and natural gas industries[M]. US: American Petroleum Institute, 2004.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 71 页)

表 5 叶片的设计要求与加工结果比较
Tab. 5 Comparison between design precision
and processed precision of vanes

叶片栅距精度 实测结果	0.01~0.03	0.03~0.05	0.05~0.09
叶片个数	85	20	15

6 结束语

本文介绍的用于火箭发动机涡轮盘叶片加工的夹具设计准则, 已经应用于生产实际, 给出的采用矢量三角函数法及 VC 软件计算夹具理论极限偏差的公式可以在夹具虚拟设计阶段判别出是否满足设计要求, 从而大大节省了研制费用, 缩短了研制周期, 节约了研制生产成本。采用该夹具生产加工出的涡轮盘组装成发动机通过了热试车考核, 实践证明该夹具设计准则正确、可靠, 对发动机生产具有指导意义。

参考文献:

[1] 刘之绳, 殷仁龙. 尺寸链计算导则[M]. 北京: 国防科工委出版, 1990.
[2] 航空工艺装备设计手册编写组. 航空工艺装备设计手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
[3] 北京有色冶金设计研究总院. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
[4] 金属机械加工工艺人员手册修订组. 金属机械加工工艺人员手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1965.
[5] 余祖西, 叶海潮, 肖洁. 一种基于平面尺寸链的定位误差计算方法[J]. 工具技术, 2010, 44(12): 39-42.
[6] 秦国华, 张卫红. 机床夹具的现代设计方法[M]. 北京: 航空工业出版社, 2006.
[7] 余祖西, 叶海潮, 王聪康. 定位误差的自动化计算方法. [J]. 工艺与检测, 2010 (9): 107-109.
[8] 臧照良. 装配时修配法尺寸链计算[J]. 机械制造及其自动化. 2009, 38(9): 51-53.
[9] 郭崇善, 王小红. 角度尺寸链求解新方法-回旋法[J]. 农业装配与车辆工程, 2009 (7): 29-30.
[10] 张晓洪. 机床设计中的角度尺寸链及其求解新方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2003 (6): 31-32.

(编辑: 马 杰)