

# 精密异形航空燃气涡轮轴承加工关键技术研究<sup>\*</sup>

范大鹏 尹自强

杨毅

(国防科学技术大学)

(湘潭机电高等专科学校)

**摘要** 异形燃气涡轮轴承的外环滚道截面形状为波瓣形, 精度要求很高。本文采用的微位移进给驱动机构具有高频响、高精度、大行程, 且控制简便的特点。在研究陶瓷结合剂 CBN 砂轮修整及磨削工艺的基础上, 采用前馈与速度反馈的控制方法, 对工件进行了加工, 得到了较好的加工表面质量和滚道轮廓曲线。

**关键词** 轴承, 直线电机, CBN 砂轮, 磨削

**分类号** TH133.3, TG580.6

## Research on the Key Machining Technology of Precision Non-circular Bearings of the Aero Gas Turbine Engine

Fan Dapeng Yin Ziqiang

(Department of Mechatronics Engineering and Instrumentation, NUDT, Changsha, 410073)

Yang Yi

(Xiangtan Institute of Machinery Electricity)

**Abstract** For high speed roller bearings used in aircraft engine, the roller slipping is one of the main causes which result in bearing damage. A kind of new roller bearings having non circular inner race is proved to be a valid method to solve the slipping problem. In this paper, a strategy to grinding the trilobed inner race by using linear motor control technique is presented and illustrated. Practical machining experiment has been made and machining results are satisfactory.

**Key words** bearings, linear motor, CBN wheels, grinding

## 1 前言

在高速、低负荷的条件下, 航空涡轮发动机的轴承会产生轻载打滑, 圆柱滚子相对滚道滑移的现象。这种情况会加速滚子和滚道的磨损, 使轴承在极短的时间内回火烧毁,

\* 1996年5月28日收稿

从而对发动机造成破坏性影响。

采用波瓣形轴承是有效地避免轴承轻载打滑的措施之一，这种波瓣形轴承与一般C级滚子轴承的主要差别是其外环滚道的截面形状为波瓣形（波瓣形曲线据设计要求而定）而非圆周长形，如图1所示。因而其加工的难点也就在于对波瓣形轮廓的加工。特别是波瓣形滚道的形状和表面粗糙度要求很高（形状误差 $< 1\mu\text{m}$ ，滚道垂直度、锥度综合误差 $< 1\mu\text{m}$ ，表面粗糙度 $R_a = 0.063\mu\text{m}$ ），且M50高温轴承钢硬度高，可磨性较差，为加工带来了更大的困难。

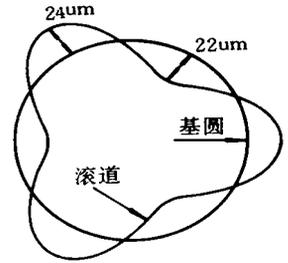


图1 外环滚道形状示意图

## 2 磨削加工系统的设计

在加工波瓣形曲线轮廓时，为同时兼顾频响、精度和行程的需要，需采用直接驱动方式的微位移进给机构。而传统的伺服电机则须用机械传动装置将旋转运动转化为直线运动，因而存在间隙、磨擦、爬行等现象，无法获得足够高的响应频率和位移精度。

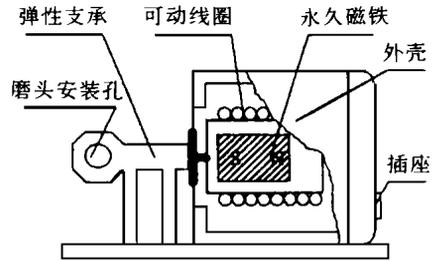


图2 直线进给驱动机构示意图

我们采用直流直线电机驱动弹性刀架进行往复运动的微位移进给机构进行加工<sup>[1-3]</sup>。直线进给驱动机构如图2所示。

在加工时，砂轮安装在弹性刀架上，随弹性刀架一起作往复运动。工件的装夹采用电磁无心夹具，这种夹具具有定位精度高（不受机床主轴回转精度的影响）、操作方便等特点。采用光电编码器检测工件的回转角度，由计算机来协调工件的回转角度和砂轮的往复运动，以实现等角度圆弧逼近，达到拟合波瓣形轮廓曲线的目的。

加工中砂轮往复运动的频率为

$$f = n \cdot k / 60 (\text{Hz}) \quad (1)$$

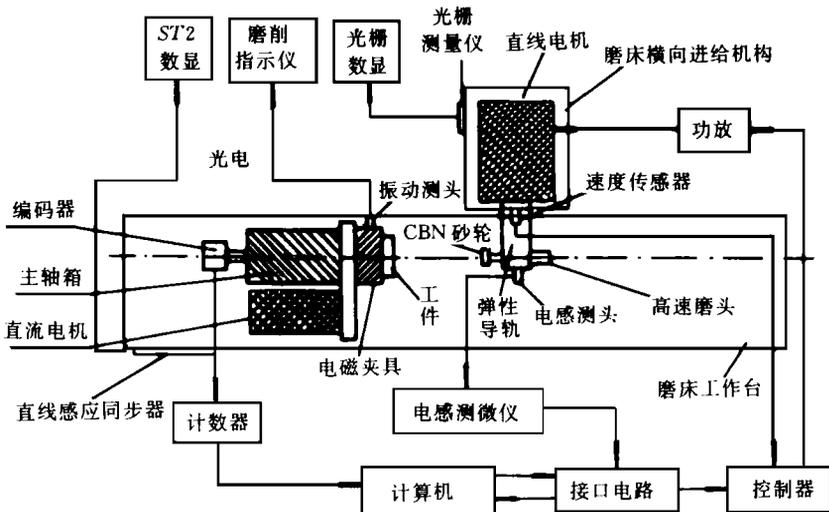


图3 轴承加工系统的构成

式中  $n$  为工件转速( $r/\text{min}$ )； $k$  为横截面的波峰数。

工件的径向进给采用手动进行，可用万能磨削指示仪监视砂轮的对刀以及磨削过程中砂轮与工件的磨削状况，也可根据万能磨削指示仪的指示决定何时进刀及进刀量的大小。工件的径向尺寸可根据光栅数显表的示值进行控制。工件的轴向对刀采用直线感应同步器进行监测。整个系统的构成如图3所示。

### 3 系统的性能测试及控制方案

#### 3.1 系统的静态特性测试

图4为在无预加载情况下刀架的静态特性曲线，从图中可以看出，系统的线性度高，无滞后差，也不存在死区，经测定，系统的灵敏度为 $0.065\mu\text{m}/\text{mV}$ ，相关系数  $r$  为 $0.99998$ ，最大线性误差为 $0.27\mu\text{m}$ 。

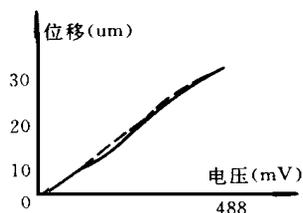


图4 系统的位移-电压曲线图

#### 3.2 系统的静态刚度测试

测试系统的静态刚度时，沿磨削抗力方向对刀架施加静态力，测出刀架对应的位移量，通过试验测定，系统在偏置电压为零时的静态刚度为 $0.89\text{N}/\mu\text{m}$ 。

#### 3.3 系统动态特性测试及辨识

系统动态特性测试系统构成如图5所示：

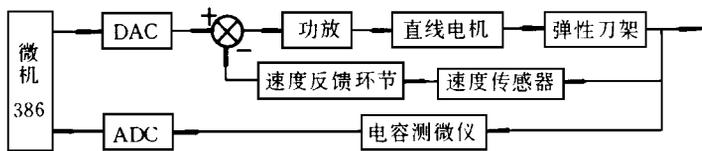


图5 系统动态特性测试构成示意图

理论及实验表明，此系统为典型的二阶环节。通过实验测得系统的谐振频率为 $74.2\text{Hz}$ ，阻尼比调整为 $0.38$ ，系统的传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{217370.41}{s^2 + 298.39s + 217370.41} \quad (2)$$

实验证明，对精密磨削而言，在进给量小( $< 10\mu\text{m}$ )的情况下，这个系统能够较好地满足加工的需要。

#### 3.4 系统的控制方案

在对系统进行性能测试的基础上，我们选取了前馈控制与速度反馈相结合的控制方法，系统控制方案如图6所示。

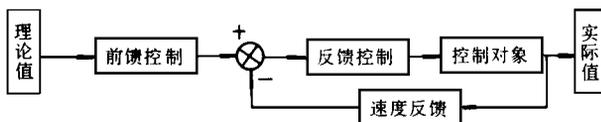


图6 系统控制方案示意图

## 4 陶瓷结合剂 CBN 砂轮的修整及磨削工艺

### 4.1 陶瓷结合剂 CBN 砂轮的修整<sup>4)</sup>

砂轮的修整包括整形和修锐。由于 CBN 砂轮具有很高的硬度，因此其修整工作要比普通砂轮困难得多。我们根据现有的条件，分别采用金刚石滚轮和单点金刚石笔对陶瓷结合剂 CBN 砂轮进行修整。CBN 砂轮的粒度分别为 60<sup>#</sup> 和 180<sup>#</sup>，浓度为 100，尺寸为  $\phi 25(D) \times 4.7^{+0.10}(T) \times 10(H) \times 3(X)$ 。

修整后的砂轮，通过 XTL- 型高倍摄影体视镜观察其表面形貌，然后再进行磨削试验。观察结果及试验表明，对于陶瓷结合剂 CBN 砂轮，采用金刚石滚轮修整时，砂轮表面磨粒突出，有较好的锐角，此时砂轮切削状态良好，磨削效率高，工件表面粗糙度也高。当采用单点金刚石笔修整时，砂轮表面磨粒较平整，磨削效率较低，但能得到较低的表面粗糙度。若采用金刚石滚轮修整后再用单点金刚石笔稍加修整，则可同时保证较高的磨削生产率和较低的表面粗糙度。

### 4.2 陶瓷结合剂 CBN 砂轮磨削工艺研究

在用以上的加工系统进行磨削加工时，各种磨削条件都会对磨削加工质量产生影响。为确定最优的磨削工艺参数，我们用正交实验法进行了工艺参数选择的实验研究，选择的因素水平包括砂轮粒度、砂轮速度、工件速度、进给量、冷却方式、修整方式、是否光磨等。选用正交表  $L_8(2^7)$  的实验方案，工件的粗糙度通过 Taly surf 轮廓仪进行检测。采用直观分析法对实验数据进行统计分析，为兼顾磨削效率和表面粗糙度等因素，则采取如下的工艺措施：

- 1 细粒度 CBN 砂轮；      ④金刚石滚轮加单点金刚石笔修整；      ④砂轮高速旋转；  
1/4 工件转速适中；      1/2 进给量不宜过大；      3/4 采用冷却液；      ⑧无需光磨。  
实际加工证明，采取这种工艺措施是十分有效的。

## 5 波瓣形轴承的磨削加工实验

由于这种波瓣形轴承在结构与加工方法上不同于普通的轴承，我们在分析电磁无心夹具定位原理的基础上，根据工件的特点，进行了精确的调整，保证了工件理想的定位精度。为同时保证轴承滚道的直线度、垂直度、锥度、等径差等加工精度，我们总结出了一套合理的工艺规范。具体实验条件如下：

磨床：在 MMB1412 型精密半自动万能外圆磨床的基础上加以改造而成；

砂轮：即为前文中的两种陶瓷结合剂 CBN 砂轮；

冷却液：煤油喷雾式冷却；

进给量：4 ~ 6  $\mu\text{m}$ ；

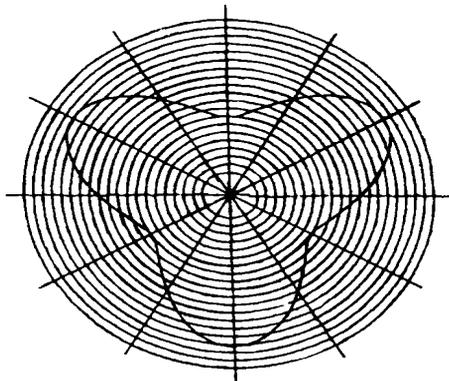


图 7 轴承滚道形状检测图(5  $\mu\text{m/s}$ )

砂轮转速: 在压力波动为 $3.6 \sim 5\text{kg/cm}^2$ 时, 转速约为 $1800 \sim 2500\text{r/min}$ ;

工件转速:  $60 \sim 70\text{r/min}$ ;

砂轮修整方式: 金刚石滚轮加金刚石笔修整。

工件加工后的滚道形状采用 Taly Rond- 73 圆度仪进行检测, 其检测结果如图7所示。

## 6 结 论

(1) 本文根据波瓣形轴承滚道形状的特点, 设计了一套高频响、高精度、大行程的直线电机微位移进给驱动装置;

(2) 对直线电机微位移进给驱动系统进行了性能测试, 建立了系统的二阶模型;

(3) 对陶瓷结合剂 CBN 砂轮的修整和磨削工艺进行了研究, 总结了降低工件表面粗糙度的措施, 采用了较合理的磨削工艺方案

(4) 采用前馈控制与速度反馈相结合的控制方法对工件进行了加工, 实验结果表明, 这种系统能满足加工精度的要求。

## 参 考 文 献

- 1 薛实福, 李庆祥. 精密仪器设计. 北京: 清华大学出版社, 1991
- 2 丁志刚, 蒋黔麟等. 微特直线电机及其控制. 杭州: 浙江大学出版社, 1987
- 3 Wang X. Experimental Research on the Linear Motor-Feed Device with High-Frequency Reponse. Long Travel and High accuracy, Annals of CIRP, 1991, 40 (1): 379 ~ 382
- 4 Malkin S. Current trends in CBN Grinding Technology, Annals of the CIRP 1985, 34 (2): 557 ~ 563
- 5 尹自强. 精密异形航空燃气涡轮轴承加工关键技术研究. [硕士论文]. 长沙: 国防科技大学机械电子工程与仪器系

(责任编辑 卢天凯)