

doi: 10.7690/bgzd.2015.12.011

## 简析航空高转速滑油泵关键技术

毛 阳<sup>1</sup>, 孙永宾<sup>2</sup>, 裴 鑫<sup>2</sup>, 赵 阳<sup>2</sup>

(1. 总参陆航部军事代表局驻洛阳地区军事代表室, 河南 洛阳 471000;

2. 陆军航空兵学院航空机械工程系, 北京 101123)

**摘要:** 为适应航空用滑油泵高转速、高集成度、高效率、长寿命和小型化的发展趋势, 对航空高转速滑油泵的关键技术进行分析。重点论述主要影响滑油泵高转速、高效率、高集成度、长寿命及高可靠性的轴承、内外转子、偏心壳体、动密封等设计, 以及过滤器、安全/调压/旁通活门和电指示器等高度集成技术, 并通过仿真、试验和应用找出解决途径。结果表明: 该研究可提高滑油泵的转速、效率、可靠性和使用寿命, 减小其体积, 满足发展要求。

**关键词:** 航空; 高速滑油泵; 轴承**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A

## Brief Analysis of Aviation High Speed Oil Pump Key Technology

Mao Yang<sup>1</sup>, Sun Yongbin<sup>2</sup>, Pei Xin<sup>2</sup>, Zhao Yang<sup>2</sup>

(1. Military Representative Office in Luoyang District, Army Aviation Department of Headquarter of General Staff, Luoyang 471000, China; 2. Department of Aviation Mechanical Engineering, Army Aviation Institute, Beijing 101123, China)

**Abstract:** For the aviation oil pump development tendency of high speed, high integration, high efficiency, long service life and miniaturization, analyze key technology of aviation high speed oil pump. Emphasize on design of discussing bear, inner and outer rotor, eccentric shell, dynamic seal and high integration technology of filter, safety/pressure regulation/bypass valve and electrical indicator which make influence on high speed, high efficiency, high integration, long service life and high reliability. Then use simulation, test and application to find out resolution. The results show that the research can improves rotation speed, efficiency, reliability and service life, minimize the size and satisfies development requirements.

**Keywords:** aviation; high speed pump; bearing

### 0 引言

随着多电发动机、全电发动机对航空附件重量、体积和集成度等技术要求的提高, 对滑油泵的转速、体积、重量、效率和集成度的要求也越来越高, 尤其是高转速和小体积。目前, 主机单位要求的新型滑油泵额定工作转速已高达 17 000 r/min, 并要求在 10 km 高空状态下, 不允许发生“气蚀”, 且容积效率要保持在 50%以上的较高水平, 而常规滑油泵在高转速地面状况下既易发生“气蚀”, 且随着转速的增加, 在 10 km 高空时, 容积效率处于 20%~37%, 甚至更低。目前, 国外的滑油泵转速可以达到 28 000 r/min。因此, 笔者对航空高速滑油泵的关键技术进行分析。

### 1 国内研究现状

国内航空泵类机载附件的专业研发厂家在泛摆线滑油泵的研制、生产、修理和试验过程中, 已掌握了多联高度集成一体化泛摆线滑油泵设计、制造和装配测试等方面的核心技术, 具体如下:

- 1) 泛摆线转子特殊曲线设计制造及优化技术;
- 2) 高速、高效、高度集成一体化泛摆线泵结构设计技术;
- 3) 抗高空“气蚀”设计技术;
- 4) 专业泛摆线泵物理(试验台)及模拟流体仿真技术;
- 5) 关键材料选择、热处理及摆线转子特种加工技术。

### 2 高转速泛摆线滑油泵关键技术

#### 2.1 工作及组成

产品工作时, 由传动花键带动传动轴旋转, 传动轴带动内转子旋转, 内转子(内转子齿数为  $Z_1$ )再带动外转子(外转子齿数为  $Z_2=Z_1+1$ )相互啮合转动, 通过密封的进、出油腔体积大小的变化, 完成吸油、压油过程, 实现滑油的输送。根据泛摆线泵理论平均体积流量公式  $Q_L=q_L \times n$  可以看出: 泛摆线泵理论输出流量与转速成正比, 控制转速便可实现滑油泵输出流量的控制, 以满足在发动机不同状态下的需求<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2015-08-03; 修回日期: 2015-09-29

作者简介: 毛 阳(1978—), 男, 河南人, 本科, 工程师, 从事航空装备保障研究。

传动轴上安装的多对内啮合的“圆弧—泛摆线转子”，分别组成一级供油泵和多级回油泵。供油泵为各润滑区域提供润滑油；回油泵能将前轴承腔油池、后轴承腔和附件机匣等处的润滑油输送回滑油箱；滑油泵同时能够为发电机提供安装支架和驱动力，为过滤器、安全活门、调压活门、旁通活门及电指示器提供集成安装孔。泛摆线泵工作原理见图1，滑油泵的工作原理见图2。

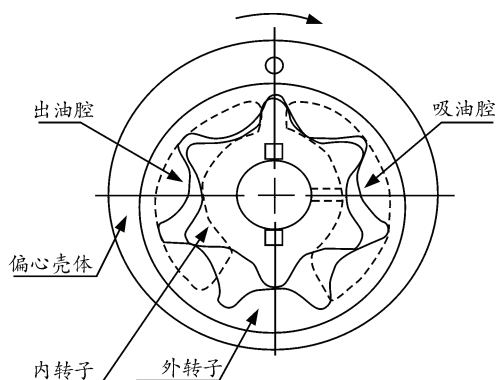


图1 泛摆线泵工作原理

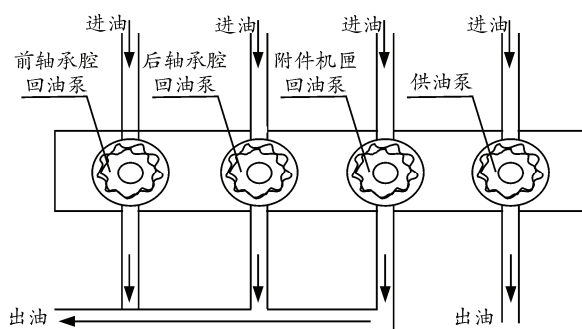


图2 滑油泵工作原理

## 2.2 技术难点

目前,据可见资料及对国内外标杆企业的调研,现有摆线滑油泵转速范围为4 000~12 000 r/min;而文中研究的滑油泵为适应航空先进滑油系统的要求,其转速高达17 000 r/min,且与其他附件采用共轴的高度集成结构。此类结构在国外已开始应用,但其最高转速为12 500 r/min,在转速为17 000 r/min的条件下尚属首次应用。根据目前滑油系统需要附件高度集成的要求<sup>[2]</sup>,文中提及的高速滑油泵组在借鉴国内外成熟产品的基础上,实现与过滤器、安全活门、调压活门、旁通活门及电指示器等的高度集成。因高速滑油泵组与目前国内现有产品转速跨度大、集成度高等特点,所以需解决以下技术难点:1) 高转速下的各运转零部件的可靠性及耐磨性;2) 高转速下的动密封技术;3) 高转速下的高空性能;4) 泵与其他附件共轴技术;5) 过滤器、

安全/调压/旁通活门及指示器的高度集成技术。

## 3 解决途径

### 3.1 解决产品高转速下各运转零部件的可靠性

#### 1) 耐高表面线速度滑动轴承的解决途径。

目前,针对航空常用铸造锡基、铅基轴承材料无法满足高转速条件下使用要求的问题,国内航空摆线泵研制专业厂已进行了20余种滑动轴承方案的研究。针对本产品的特点,可以通过“表面涂覆耐磨自润滑涂层二硫化钼或聚四氟乙烯,聚酰亚胺材料直接加工成型,采用三层复合材料JS-1轴承”等多种方法来保证高转速下滑动轴承的可靠性和耐磨性。根据高速滑油泵组的结构特点拟选用新型三层复合材料JS-1轴承。

#### 2) 耐高转速内/外转子的解决途径。

充分借鉴国内已经过4 000 h耐久性考核的产品(转速为12 000 r/min)研制经验,分别从材料、热处理方式、转子参数优化和机加工工艺等方面提高转子的耐磨性能,具体如下:

① 为防止内/外转子在高温、高速相互滑动过程中发生胶合和异常磨损,除了选择高性能耐磨合金钢或铸铁外,还需根据内/外转子存在速度差(外转子是内转子速度的 $Z_1/Z_2$ )的特点,采用不同的热处理工艺,不仅可以提高表面硬度,提高其耐磨性,还可以控制内外转子不同硬度值,实现内外转子软硬组合的方式,提高其抗胶合性能。

② 通过优化创成系数 $k$ 和弧顶系数 $h$ 的方式,实现泛摆线转子结构优化,降低内外转子相对滑动速度,减小内/外啮合半径,实现17 000 r/min内/外转子啮合线速度与12 000 r/min啮合线速度相近,从而达到使用要求<sup>[3]</sup>。

#### ③ 根据泛摆线坐标点公式:

$$x = R \cos\left(\frac{\Phi}{Z_2}\right) + e \cos \Phi - a \frac{R \cos\left(\frac{\Phi}{Z_2}\right) + Z_2 e \cos \Phi}{\sqrt{R^2 + e^2 Z_2^2 + 2 R e Z_2 \cos\left(\frac{Z_1}{Z_2} \Phi\right)}};$$

$$y = R \sin\left(\frac{\Phi}{Z_2}\right) + e \sin \Phi - a \frac{R \sin\left(\frac{\Phi}{Z_2}\right) + Z_2 e \sin \Phi}{\sqrt{R^2 + e^2 Z_2^2 + 2 R e Z_2 \cos\left(\frac{Z_1}{Z_2} \Phi\right)}}。$$

结合Excel电子表格,CAD软件合理提高特殊加工过程中的坐标点密度,从而提高转子表面光洁度及配合精度。

#### 3) 耐高转速偏心壳体的解决途径。

目前，国内圆弧—泛摆线滑油泵偏心壳体以采用硬铝/锻铝合金为主，为提高其耐磨性，国内专业厂已开始进行陶瓷材料使用的研究。与硬铝合金相比，该材料具有较强的耐磨性和较小的摩擦系数，已成功应用在国外同类产品上；因此，可以通过采用耐磨陶瓷材料加工偏心壳体来满足使用要求。

### 3.2 解决高转速下的动密封

目前，航空产品动密封多采用皮碗填料密封的方式，此种密封方式能够在低转速（一般在 8 000 r/min 以下）的情况下提供可靠的密封，但高转速泛摆线泵在轴切线速度较高的工况下，皮碗填料密封难以达到较好的密封效果，且其密封轴时过盈量过大，损耗一部分传递功率，导致泵整体效率下降。根据目前航空油泵专业厂家对动密封的研究，可以通过以下 2 种途径进行解决<sup>[4]</sup>：

- 1) 采用耐高线速度、摩擦系数小和耐磨性好的高性能聚四氟乙烯弹簧蓄能密封圈；
- 2) 优化产品结构，采用适用于高转速条件下的机械密封结构。

### 3.3 保证高空状态下的产品性能，避免“气蚀”

滑油泵在高空状态下，转速越高，越不利于保持产品的高空性能，越易发生“气蚀”现象，针对此问题，其解决途径如下：

1) 对滑油泵配油盘进行优化设计，尽量减小无效密封面积，扩大进油面积，优化转子参数，改善油泵的进口填充条件<sup>[5]</sup>。具体如图 3 所示。

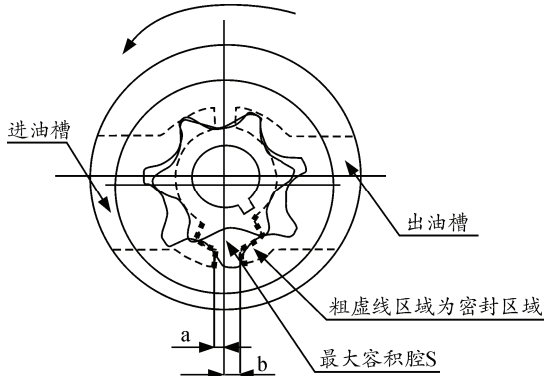


图 3 隔板结构优化

2) 建立三维数学模型，采用专业泵仿真软件进行仿真分析，及时发现影响高空性能的设计参数并进行设计改进。仿真分析压力云图如 4 所示。

3) 在现有产品的基础上进行物理仿真试验，结合设计计算和模拟仿真，确定合理的产品结构和设计参数。

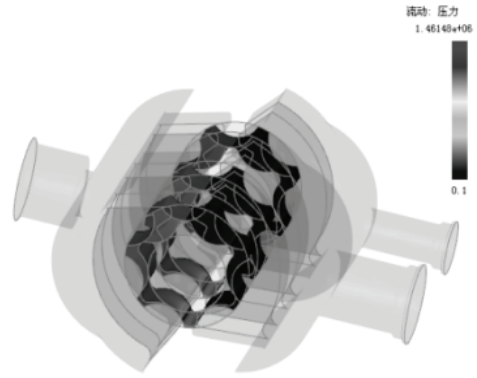


图 4 仿真压力云图

### 3.4 实现泵与其他附件共轴技术

高转速共轴技术存在 2 个难点：1) 传动轴强度难以满足使用要求；2) 轴承温升过快难以满足使用要求。针对以上 2 点，解决途径如下：

1) 结合产品使用要求和产品结构，对传动轴进行结构设计和强度分析，合理选择零件的材料及热处理工艺方法，提高其表面硬度并保证其心部韧性。建立三维数学模型，进行轴功率、轴转动扭矩仿真分析和轴抗疲劳强度应力分析，找出薄弱环节，完善设计。

2) 其他附件转子高速运转所产生的离心力使轴承将承受更大的载荷，造成轴承温升过快，轴承使用寿命降低。为了保证泵带动发电机转子在高转速条件下的工作可靠性，通过对轴承结构设计，形成动压油膜，将轴承与传动轴间的边界摩擦转换成液体摩擦。动压油膜的承载能力强，又能通过循环不断地将轴承热量带走，能够很好地解决轴承的温升问题，对轴承起到良好的润滑和冷却作用。

### 3.5 多种附件的高度集成技术

要实现过滤器、安全/调压/旁通活门及电指示器等高度集成，存在以下难题：若高集成度滑油泵结构设计不合理，将导致体积、重量过大，难以突出高集成度的优点，失去集成的意义。针对此问题，其解决途径如下：

首先，根据产品功能要求绘制产品详细组成原理图（如图 5 所示），而后依据性能指标要求，确定内/外转子等关键零部件尺寸；

其次，根据外廓尺寸要求和与主机的交互联系，进行整体布局，以关键件为核心尺寸，通过三维数学建模，在满足强度的同时，构造出结构紧凑、强度满足要求的产品数模。

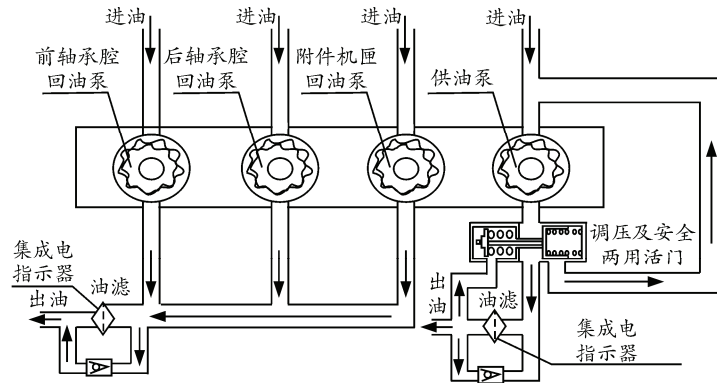


图 5 高度集成滑油泵组成原理

### 4 结论

在设计高速、高空滑油泵时，笔者有针对性地  
对轴承、内外转子、偏心壳体、动密封、抗气蚀结  
构和共轴集成技术进行合理分析和设计，既可以提  
高滑油泵的转速和效率，减小其体积，又可以有效  
地提高滑油泵的可靠性和使用寿命，使其满足航空  
用滑油泵高转速、高集成度、高效率、长寿命和小  
型化发展趋势的要求。

\*\*\*\*\*

(上接第 32 页)

所加载语法内容如上文所述的，可选择“独占引  
擎”或“公用引擎”；可调用 Windows 内置文件进  
行语音识别训练，也可以自己编辑语音识别训练文  
档；加入列表框来显示语音识别过程，可看到识别  
最终结果；加入语法解析列表，可看到识别结果的  
指令；可以在训练中调整说话的语气、方式等，以  
使语音识别的效率更好；在底部加入发布命令按钮，  
作为语音识别的补充，使训练过程更加顺畅。整体  
界面如图 5。

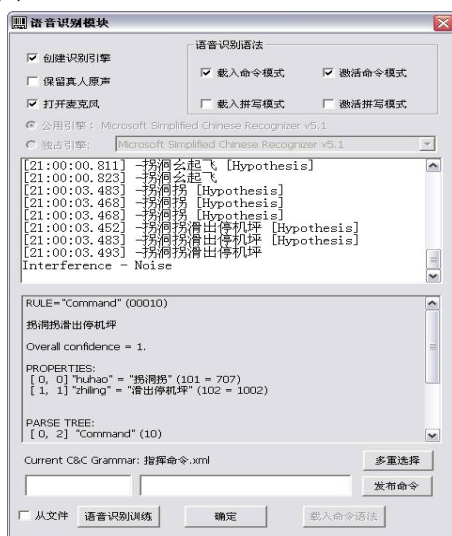


图 5 语音识别程序界面

### 参考文献：

[1] 何存兴. 液压元件[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982: 23-45.  
 [2] 徐学忠. 内啮合摆线齿轮泵的理论研究与仿真[D]. 南京: 东南大学, 2005: 10-35.  
 [3] 杨元模, 黄春英, 万曼华. 提高内啮合圆弧-泛摆线齿  
轮泵容积效率的设计[J]. 液压与气动, 2005(2): 13-15.  
 [4] 威尔逊 R.J. 滑动轴承设计手册[M]. 尚礼, 姚交兴, 阮  
鹿令, 等, 译. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1988:  
133-137.  
 [5] 李一冰. 基于网络的内啮合摆线齿轮泵设计系统研究  
[D]. 南昌: 南昌大学, 2007: 6-20.

### 4 总结

笔者利用 Microsoft Speech SDK 5.1 开发包语  
音识别程序，因为不涉及硬件方面改动，只在软件  
层面开发，降低应用程序的开发难度和门槛，便于  
二次开发用于工程实践。语音识别系统开发完成后，  
在使用时配置简单，易于使用，扩展性好。在使用  
过程中，需要使用者对电脑进行训练，让电脑了解  
使用者的说话口音、断字断句习性。一般来讲，该  
系统能很好地识别中文标准普通话。在程序实际使  
用中，可满足指挥员实时调度飞机的要求，基本上  
能做到模拟训练的无障碍运行。对于方言口音比较  
重的使用者来说，识别精度会有所下降。该方法也  
可用于同样具有规范化的语音指令模拟训练中。

### 参考文献：

[1] 刘建德, 江国华. 基于 PC 的飞行指挥训练系统[J]. 计  
算机应用, 2009, 29(12): 3413-3416.  
 [2] 单煜翔, 刘妍, 刘加. 一种联合语种识别的新型大词汇  
连续语音识别算法[J]. 自动化学报, 2012, 38(3):  
366-374.  
 [3] 范婷, 刘宏. 电视背景环境下语音命令识别系统[J]. 华  
中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(11): 312-315.  
 [4] Microsoft Corporation. Microsoft Speech SDK SAPI 5.1  
Help[Z]. Microsoft Corporation, 2001.  
 [5] 林鸣宵. 基于 Speech SDK 的语音识别技术在三维仿真  
中的应用[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(11):  
160-162.