

# 发动机涡轮泵流体动静压轴承应用分析

苗旭升, 李 斌, 黄智勇

(陕西动力机械设计研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 针对液体火箭发动机涡轮泵特殊工作环境, 讨论了流体动静压轴承可采用的结构形式和需要解决的关键技术。提出了径向轴承宜采用腔式结构, 止推轴承宜采用螺旋槽或瓦块结构; 并针对液氧涡轮泵动静压轴承提出了研究需要解决的关键技术。

**关键词:** 液体火箭发动机; 涡轮泵; 流体动静压轴承

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2004)06-0001-04

## Application Analysis of Liquid Hybrid Bearing for Engine Turbopump

Miao Xusheng, Li Bin, Huang Zhiyong

(Shaanxi Power Machine Design & Research Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** This paper mainly discusses available structures of the liquid hybrid bearings and the key technologies that need to be solved for the liquid rocket engine turbopump. It was suitable for radial hybrid bearing to adopt column bearing, and for axial bearing to adopt spiral groove bearing or tiling bearing under the special environment of liquid rocket engine turbopump. At the end of this paper, some key technologies about oxygen hybrid bearing application in the engine turbopump are proposed.

**Key words:** liquid rocket engine; turbopump; liquid hybrid bearing

### 1 引言

为了适应天地往返运输系统和可重复使用运载器长寿命高可靠性的需要, 必须研制出长寿命、高可靠、可重复使用的液体火箭发动机。涡轮泵

是液体火箭发动机的“心脏”部件, 它的可靠性往往决定着发动机的寿命, 而轴承作为摩擦磨损件是制约涡轮泵寿命的主要因素。

以往, 我国液体火箭发动机涡轮泵转子支承采用滚动轴承方案, 这主要是因为这些型号的发动机要求工作时间短。现在, 液体火箭发动机工

收稿日期: 2004-07-08; 修回日期: 2004-07-15。

作者简介: 苗旭升 (1971—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机涡轮泵技术。

作压力更高,使得涡轮泵的径向载荷和轴向载荷大幅度提高。同时,为了提高涡轮泵的性能,减小涡轮泵结构重量,转速也愈来愈高,这些因素恶化了滚动轴承的工作条件。同时,现在运载器要求发动机的启动次数增多,工作时间加长,使滚动轴承的适应性受到很大限制。

本文的研究目的在于探究流体动静压轴承在液体火箭发动机上应用的可行性及需要解决的关键技术。

## 2 流体动静压轴承特征分析

作为涡轮泵的支撑必须包含径向轴承和止推轴承,以承受来自其径向和轴向载荷。径向轴承可选择动静压腔式轴承、动静压可倾瓦轴承和动静压箔轴承等。止推轴承可选择环形液腔止推轴承、瓦块式止推轴承、螺旋槽止推轴承和箔止推轴承等几种类型。我们优选出能满足发动机涡轮泵的特殊环境、可靠性相对较高、便于加工的轴承结构形式。

### 2.1 结构形式选用原则

根据液体发动机涡轮泵工作特点,选择的动静压轴承应满足以下原则:

- (1) 从几何尺寸上来说,能代替标准滚动轴承的安装尺寸或适应涡轮泵结构要求;
- (2) 发动机能提供所要求的输入静压、润滑流量;
- (3) 在几何尺寸、输入静压和润滑流量能接受的情况下,满足发动机承载要求;
- (4) 工作的可靠性高,结构简单,工艺性好。

### 2.2 动静压轴承工况条件

液氧是目前国际上先进发动机普遍采用的氧

化剂,如美国的 SSME 氢氧发动机、俄罗斯的 ДА-120/ПА170 液氧/煤油发动机、日本的 LE-7 氢氧发动机等。我国未来液体火箭发动机也采用液氧作为氧化剂。其低粘度、低温度具有代表性。针对液氧的环境、大载荷、高转速,我们对涡轮泵上可采用的动静压轴承结构形式进行探讨。

### 2.3 径向轴承

对于径向轴承,主要研究以下五种工作结构的轴承,分别为纯动压圆柱轴承、纯静压腔式轴承、动静压腔式轴承、可倾瓦动静压轴承和动压箔轴承。下面表 1 列出了以上几种轴承有关参数的计算结果,该计算模型中:转速为 20000r/min,轴承内径为 70mm,轴承宽度为 50mm,径向载荷为 20000N,工作介质为液氧,粘度为  $1.93 \times 10^{-4} \text{kg/m}\cdot\text{s}$ ,本文只取了一组具有代表性的尺寸进行了比较。

纯静压腔式轴承结构为四油腔深腔结构,周向无回油槽,它主要靠静压将轴系浮起。动静压腔式轴承以缝隙式节流为例进行的分析,可倾瓦动静压轴承采用五瓦结构,箔轴承为弯曲型结构。

理论上,流体动静压轴承工作时的偏心率越高,轴承工作时的油膜厚度越小,轴承工作的可靠性及轴承加工的工艺性就越差,轴承方案就越不可取。由表 1 中可以看出,在相同轴承结构尺寸、工作环境和承载要求的情况下,纯动压圆柱轴承的偏心率最高,油膜厚度最小,其次为可倾瓦动静压轴承和动压箔轴承,偏心率较小的为纯静压腔式轴承和动静压腔式轴承。因此,可初步选出纯静压腔式轴承和动静压腔式轴承,作为研究方案。

表 1 径向动静压轴承方案比较

Tab.1 Comparison of different radial hybrid bearings

	纯动压圆柱轴承	可倾瓦动静压轴承	纯静压腔式轴承	动静压腔式轴承	动压箔轴承
半径间隙, mm	0.015	0.02	0.015	0.025	0.02
偏心率	0.95	0.9	0.65	0.65	0.8
最小油膜厚度, $\mu\text{m}$	0.75	2	5.25	8.75	5
润滑流量, l/s			3	0.4	
供应静压, MPa			20	20	

这两种轴承中，纯静压腔式轴承的润滑流量为 3l/s，而动静压腔式轴承的润滑流量却只有 0.4 l/s，从润滑流量提供的可行性和它对涡轮泵工作影响来说，动静压腔式轴承更可取。

采用动静压可倾瓦轴承需要在瓦块的铰支处引入高静压，从目前的工艺和密封技术来说，在铰支处引入高静压是很难解决的问题。而且，在液氧中铰链的摩擦会大大降低轴承的可靠性。而动静压箔轴承需要从轴上引入高静压，结构复杂，亦不可取。

综上所述，径向轴承宜采用动静压腔式轴承。

### 2.4 止推轴承

止推动静压轴承主要研究的结构形式为环形液腔止推轴承、瓦块式动压止推轴承、螺旋槽止

推轴承和箔止推轴承。下面表 2 列出了以上几种轴承有关参数的计算结果，该计算模型中：转速为 20000r/min；轴承内径为 80mm；轴承外径为 140mm；轴向载荷为 24500N；工作介质为液氧，粘度为  $1.93 \times 10^{-4} \text{kg/m}\cdot\text{s}$ ，本文只取了一组具有代表性的尺寸进行了比较。

从表 2 计算可以看出，采用相同的油膜厚度时，环形静压止推轴承所需要的润滑流量过大，且一起动就要提供所需的静压，因此该方案需要外供静压系统。箔止推轴承的润滑流量很小，但是承载能力很弱，而且一起动就需提供高静压，因此该方案需外供静压系统。瓦块式止推轴承和螺旋槽止推轴承为动压轴承，润滑流量较小，不需要提供高静压，较为可取。

表 2 止推轴承方案比较

Tab.2 Comparison of different axial bearings

	环形液腔止推轴承	瓦块式动压止推轴承	螺旋槽止推轴承	箔止推轴承
最小油膜厚度, mm	0.013~0.02	0.013	0.013	0.013
润滑流量, l/s	0.7~2	0.2	0.005	0.13
供应静压, MPa	6	—	1.2	>20

## 3 关键技术分析

国内对于低温、低粘度、耐氧化的流体动静压轴承没有研制经验，需要围绕这些新特点，在设计、计算理论、材料工艺方法、试验设施的建立及轴承性能试验等方面开展充分的研究。其中关键技术有：

### 3.1 设计方法

(1) 建立符合工程实用的液氧等低温介质中动静压轴承的流体润滑物理、数学模型，数值计算方法和相应的软件；

(2) 动静压轴承的动态特性及其对轴系的影响，控制轴系稳定性的方法；

(3) 安全起停技术及其外加静压系统的研究。

### 3.2 结构和工艺

(1) 液氧等低温介质中减磨和耐磨涂镀层材料的选择。材料介质相容性，材料摩擦磨损性能

和涂镀层工艺的研究；

(2) 轴承产品加工及精度保证工艺。

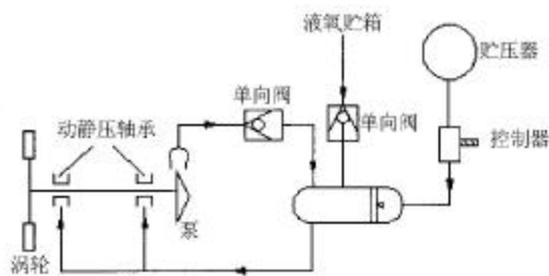


图 1 外加静压系统方案

Fig.1 Accessory pressure supply system

### 3.3 试验技术及其检测技术

(1) 建立低温材料摩擦试验台，测试和观察试验过程摩擦副的物理和化学现象；

(2) 建立低温流体动静压轴承试验台，测量轴承的各项静动特性，磨损和寿命；

(3) 各种瞬态参数的测试技术及处理系统。

## 4 安全起停技术

所有流体动静压轴承，在启动和停机的过程中，轴和轴瓦之间要产生接触和磨损，使工质温度升高，在液氧中容易发生事故。为了减少和避免轴承基体直接摩擦和温升，可考虑以下两种方案。

### 4.1 减磨镀层

在轴承的瓦块表面，镀一层与工作介质（液氧）相容且摩擦系数很小的材料，保证在要求的起停次数和载荷下轴承能安全工作。

美国 M.Stoltzfus 等研究液氧镀层材料指出：Teflon S 和石墨氟化物增强的聚酰亚胺效果较好，Teflon 次之，银也可以。国内在借鉴国外的成果基础上，曾研究了 Ni-P-PTFE、Cu-PTFE、Ni-Cu-Ag 和 MoS<sub>2</sub> 等方案，且 MoS<sub>2</sub> 已在 YF-75 等型号的滚动轴承上得到应用。动静压轴承可采取在其表面镀 Ni-Cu-Ag 或 MoS<sub>2</sub> 的综合方案。

### 4.2 外加静压

当泵不能提供足以使轴系抬起的静压时，由泵外供给静压，称为外加静压。目的是保证在低于抬起转速时，轴就与瓦脱离接触，轴承永不磨损。

实施办法如图 1 所示。该系统由一个储压器，一个控制阀，两个单向阀和管路组成。它的工作过程是在泵充填过程中，充填储压器，发动机在启动前一瞬间，打开控制阀，由储压器向轴承供压，将轴承浮起，预计已经将轴浮起时，关闭控制阀。在发动机停车的前一瞬间，打开控制阀，保证轴承内的压力不会降落，轴停止旋转时，关闭控制阀。

该系统的各部分设计难度不大，动作也简单，不会对可靠性造成不利影响。不利的是增加了发动机质量，估算该系统质量为 2kg~3kg。

## 5 结论

通过对流体动静压轴承近一年多的研究表明：

(1) 理论上，流体动静压轴承应用于火箭发动机是可行的；

(2) 径向流体动静压轴承宜采用动静压腔式轴承，止推流体动静压轴承宜采用螺旋槽结构或瓦块结构。

### 参考文献：

- [1] A Minnick and S Peery, Design and Development of an Advanced Liquid Hydrogen Turbopump[R]. AIAA 98-3681.
- [2] G Crease, R Lyda, J Park, A Minick. Design and Test Results of an Advanced Liquid Hydrogen Pump[R]. AIAA 99-2190.
- [3] R W Bursey, Jr, et al. Advanced Hybrid Rolling Element Bearing for the Space Shuttle Main Engine High Pressure Alternate Turbopump[R]. AIAA 96-3101.
- [4] Redcliffe J M, Vohr J H. Hydrostatic Bearing for Cryogenic Rocket Engine Turbopump[J]. ASME Journal of Lubrication technology, 1969.7.
- [5] 许尚贤. 液体静压和动静压滑动轴承设计 [M]. 东南大学出版社, 1989.

(编辑：王建喜)