

# 多孔质气体静压轴承在三轴转台设计中的应用

杜金名

(第二炮兵装备研究院第三研究所, 北京 100085)

**[摘要]** 气体静压轴承广泛应用于航空、航天、精密电子工业中。三轴转台是高精度的测试设备, 用来对惯性系统和惯性元件进行检定、标定以及建立相应的误差模型, 它的测试精度直接影响航空、航天等飞行器的控制和导航。转台的检测精度与回转轴的回转精度有密切关系。多孔质气体静压轴承同其他节流形式的轴承相比具有很高的承载能力、静态刚度以及很好的阻尼效应。文章对多孔质气体静压轴承进行了理论分析, 并同气体静压小孔节流轴承的静态性能进行了比较, 结果表明, 此类轴承的承载能力明显优于小孔节流轴承。

**[关键词]** 气体静压轴承; 多孔质; 小孔节流; 三轴转台

**[中图分类号]** TH133.36 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)01-0065-04

## 1 前言

20世纪20年代, 国外报道过利用压缩气体作为润滑介质的研究。由于对控制精度要求越来越高, 特别是国防工业和核工业发展的要求, 科技人员对流体静压进行了深入研究。尽管流体静压轴承有不同的形式<sup>[1,2]</sup>, 但基本工作原理相同, 流体薄膜都是在外部压力作用下形成的。

多孔材料的材质种类繁多, 应用范围极其广泛, 结构和特性涉及到很多方面, 由于使用目的不同, 对材料性能的要求及其表征形式各异。一般多孔材料系指孔隙度大约在15%以上的材料。由于大量孔隙的存在, 使其在性能方面与材质相同的致密材料有很大的差别, 而孔隙特性是多孔材料的基本特性。由于多孔质材料的特殊性, 利用它作为流体静压轴承表面, 可提供成千上万的微小的节流孔, 这些节流孔均匀地分布在轴承表面, 可以产生均匀的压力分布以及非常高的承载能力和静态刚度<sup>[3]</sup>。对于给定的多孔质材料, 若能确切地知道其内部流体的流动特性, 则多孔质流体静压轴承的设计和制造是最简单的, 因为节流孔已经实际存在

于轴承之中。

与传统的滚动轴承和滑动轴承相比, 多孔质气体静压轴承回转精度高<sup>[4]</sup>、无摩擦、无磨损, 并且轴承中的压力薄膜具有均化效应及速度范围宽、驱动功率消耗少、低速进给无爬行、定位精度高、阻尼特性优异等优点<sup>[5]</sup>。笔者以止推轴承为依托, 从理论分析和实验验证两方面介绍多孔质气体静压轴承。

## 2 三轴转台回转轴系轴承的设计

由于多孔质流体静压止推轴承可应用于三轴转台的回转轴系、超精密机床和精密量仪的主轴上, 因此研究此类轴承的静态性能至关重要。止推轴承, 尤其是圆板状止推轴承, 是进行理论分析的最简单的几何模型, 为此笔者结合圆板止推轴承做出理论分析。多孔质流体静压止推轴承的物理结构和坐标系如图1所示。多孔质节流板的厚度为 $H$ , 轴承的上表面倾斜角度为 $\gamma$ 。

对于气体静压轴承, 气体的流动可以做如下假设:

- 1) 流体在多孔质介质内部的粘性流动起主导



对式(10)至式(12)进行积分, 得到

$$u = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial r} (z-h) \left( z + \frac{h}{3} \xi_1 \right) \quad (15)$$

$$v = \frac{1}{2\eta r} \frac{\partial p}{\partial \theta} (z-h) \left( z + \frac{h}{3} \xi_1 \right) \quad (16)$$

式中  $\xi_1$  为滑移系数,  $\xi_1 = 3(\varphi^{1/2} h/\alpha)/[h(h + \varphi^{1/2}/\alpha)]$ ;  $h$  为轴承间隙 ( $\mu\text{m}$ )。

气体薄膜厚度为

$$h = h_0 - (h_0 - h_2) \frac{r}{R} \sin \gamma \quad (17)$$

式中  $h_0$  为平均气体薄膜厚度 ( $\mu\text{m}$ );  $h_2$  为最小气体薄膜厚度 ( $\mu\text{m}$ );  $\gamma$  为轴承上表面倾斜角度 (rad)。

写成无量纲形式为

$$\bar{h} = 1 + \varepsilon(1 - \bar{r} \sin \gamma) \quad (18)$$

式中  $\varepsilon$  为无量纲倾斜参数,  $\varepsilon = (h_0 - h_2)/h_2$ 。

质量守恒方程为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) = 0 \quad (19)$$

把式(15)、式(16)代入式(19), 并在整个气体薄膜厚度上积分, 利用边界条件式(14), 可以得到气体薄膜内部压力分布方程为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r h^3 (1 + \xi_1) \frac{\partial p^2}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \times \left[ h^3 (1 + \xi_1) \frac{\partial p^2}{\partial \theta} \right] = 12 \varphi_z \left( \frac{\partial p^2}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (20)$$

写成无量纲形式为

$$\frac{1}{\bar{r}^2} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left( \bar{h}^3 (1 + \xi_1) \frac{\partial \bar{p}^2}{\partial \bar{r}} \right) + \frac{1}{\bar{r}^2} \frac{\partial}{\partial \bar{\theta}} \times \left( \bar{r} \bar{h}^3 (1 + \xi_1) \frac{\partial \bar{p}^2}{\partial \bar{\theta}} \right) = 12 \varphi_z \frac{R^2}{h_2^3 H} \frac{\partial \bar{p}^2}{\partial \bar{z}} \Big|_{\bar{z}=0} \quad (21)$$

式中  $\bar{p}$  为无量纲气体薄膜压力,  $\bar{p} = p/p_a$ 。

相应的边界条件:

1) 供气边界条件为  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ,  $z = -H$  时,  $p' = p_s$ ;

2) 连续性边界条件为  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ,  $z = 0$  时,  $p' = p$ ;

3) 大气边界条件为  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ,  $r = R$ ,  $0 \leq z \leq h$  时,  $p = p_a$ ;

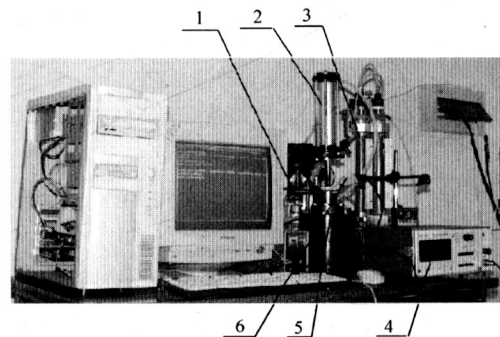
4) 密封边界条件为  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ,  $r = R$ ,  $-H \leq z \leq 0$  时,  $\partial p'/\partial r = 0$ 。

用承载能力、静态刚度和质量流量来表征多孔质气体静压轴承的静态性能。利用上述公式推导出薄膜内部压力的有限元数学模型, 计算出轴承的压力分布, 并进一步给出轴承的承载能力和静态

刚度。

### 3 实验分析

实验研究是流体静压支承性能研究中的重要手段, 测量和分析轴承性能参数对验证理论分析和改进轴承性能均具有重要意义。止推轴承是众多轴承类型中最简单的形式, 了解此类轴承特性同样能够反映其他类型轴承的特性。基于所设计的空气静压支承系统, 可以很方便地测得流体膜的厚度、薄膜间的压力分布、薄膜刚度和承载能力。利用测得的结果绘图, 可以直观地得出此类轴承的特性。测试装置如图2所示, 主要包括气路系统、实验台和测量装置三部分。



1—压力调节阀; 2—气缸; 3—转子流量计;  
4—电感测微仪; 5—实验台; 6—测头

图2 空气静压止推轴承测试装置

Fig.2 Rig of aerostatic thrust bearings

加载过程由活塞完成, 测压装置由测压板及压力传感器完成; 测压板用来支承试样, 压力传感器用来测量气体薄膜的压力。测量装置由压力传感器、A/D板、ATX386组成。压力信号由压力传感器拾取, 经过A/D板的数模转换进入计算机, 获得压力信号的电压值, 再根据压力传感器的标定曲线得到压力值。

实验所用的轴承参数:

1) 多孔质止推轴承: 直径  $D = 50 \text{ mm}$ ; 厚度  $H = 3 \text{ mm}$ ; 渗透系数  $\varphi = 1.14 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ; 孔隙度  $\Pi = 30 \%$ 。

2) 小孔节流止推轴承: 直径  $D = 50 \text{ mm}$ ; 节流孔分布直径  $D_1 = 25 \text{ mm}$ ; 节流孔数  $n$  分别为 4, 6, 8, 节流孔直径  $d = 0.2 \text{ mm}$ ; 供气压力  $p_s = 0.5 \text{ MPa}$ 。

多孔质止推轴承与三个小孔节流止推轴承 (节流孔数分别为 4, 6, 8) 的承载能力和刚度测量结

果分别绘于图3和图4。从图3可以看出,多孔质轴承承载能力明显高于小孔节流轴承;小孔节流轴承的承载能力随着小孔数目的增加而增大。多孔质空气静压止推轴承的承载能力与理论计算数值拟合良好。从图4可以看出,小孔节流止推轴承的静态刚度比多孔质止推轴承要高。而对于小孔节流轴承而言,轴承的静态刚度随着小孔数目的增加而增大。

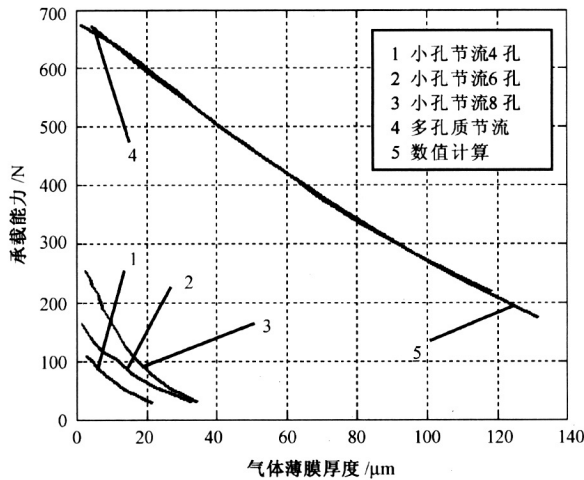


图3 空气静压轴承承载能力比较

Fig.3 Compare of load capacity in aerostatic thrust bearing

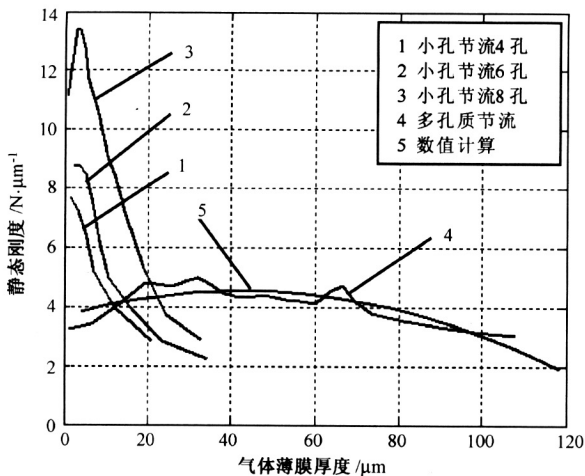


图4 空气静压轴承静态刚度比较

Fig.4 Compare of static stiffness in aerostatic thrust bearings

对于4孔轴承而言,轴承静态刚度最大时,轴承的气膜厚度为 $0\sim 1.6\ \mu\text{m}$ ;对于6孔轴承而言,轴承静态刚度最大时,轴承的气膜厚度为 $2.4\sim$

$3.8\ \mu\text{m}$ ;对于8孔轴承而言,轴承静态刚度最大时,轴承的气膜厚度为 $12\sim 14\ \mu\text{m}$ ;对于多孔质轴承而言,轴承静态刚度最大时,轴承的气膜厚度为 $32\sim 28.8\ \mu\text{m}$ 。多孔质止推轴承的刚度很小,但是,此类轴承静态刚度分布范围较广,这说明此类轴承的动态效果良好。究其原因主要是多孔质材料的渗透系数过大造成的。众所周知,多孔质材料作为静压空气轴承的节流器会提高轴承的承载能力。但是,若要获得预期的刚度,多孔质材料的渗透系数必须小于 $10^{-12}\ \text{m}^2$ ,而这种多孔质材料采用通常的工艺难以获得。多孔质静压轴承静态刚度与数值计算结果吻合良好,说明数值计算具有一定的正确性和可行性。

## 2 结论

上述讨论和分析表明,多孔质气体静压轴承与小孔节流轴承相比,具有4个显著特点:

1) 结构简单、制造方便;

2) 承载能力高;

3) 若能正确选择多孔质材料或对多孔质材料的粘性渗透系数进行有效控制,则静态刚度更优越;

4) 由于多孔质材料的整体由微孔组成,气体可在其内部任意流动,因而有利于系统减振,有效地抵抗外界振动的干扰。

多孔质气体静压轴承是一种新型轴承,它本身还有一些关键问题(如简单易行的加工方法)有待解决,但是其优越性不容忽视。它在航空、航天以及现代武器系统研制中具有诱人的应用前景。

### 参考文献

- [1] 陈雪梅,黎文兰. 气体轴承技术及其应用 [J]. 润滑与密封, 2000, (4): 61~63
- [2] 王元勋,陈尔昌,师汉民,陈日曜. 气体润滑轴承的研究与发展 [J]. 湖北工学院学报, 1994, 9 (3): 155~159
- [3] Stout K J. Aerostatic bearings in slocum [A]. Precision Machine Design [M]. Prentice-Hall, 1992
- [4] 刘亚忠,张先彤,孙靖民,王新荣. 有限元法在三轴转台机械系统设计中的应用 [J]. 中国惯性技术学报, 1996, 4 (4): 66~72
- [5] 杜金名. 多孔质流体静压轴承润滑技术的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003. 1~2

(下转第75页)

- [ 8 ] Xie Yanqing. Vague grey extension space [A]. IIGSS - CB MFDI&SCMS [C], 2002
- [ 9 ] 赵克勤. 集对分析及其应用 [M]. 浙江: 浙江科学技术出版社. 2000
- [10] 郭开仲, 张士强. 消错学引论 [M]. 广东: 华南理工大学出版社. 1995
- [11] Tsoularis A, Wallace J. Analysis of logistic growth models [J]. *Mathematical Biosciences*, 2002, 179: 21~55
- [12] Wolfram S. *Theory and Applications of Cellular Automata* [M]. World Scientific, Singapore, 1986
- [13] 周星宇, 贺仲雄. Vague 匹配决策支持系统及其在人才调配中应用 [A]. 2003 年中国智能自动化学术会议论文集 [C]. 香港, 2003
- [14] 周星宇, 贺仲雄. 集对匹配决策支持系统及其在人才调配中应用 [A]. 中国人工智能进展论文集 [C]. 北京: 邮电大学出版社, 2003
- [15] 史忠植. 高级人工智能 [M]. 北京: 科学出版社, 1998

## Model of SARS Analysis, Forecast, and Treatment Intelligence Decision Supporting System

Zhou Xingyu, Zhang Jiang, Liu Yang, Xie Yanqing, Zhang Ran,  
Zhao Yang, Hong Yuehua, He Zhongxiong  
(*Beijing Jiaotong University tower 4 room 707, Beijing 100044, China*)

[**Abstract**] This paper presents an intelligence decision supporting system to prevent and control such disease like SARS. Using some new decision supporting theories, an intelligent decision supporting system can be created to conduct the noise analysis of SARS epidemic situation, forecast the evolution direction of the epidemic, and give proper solution. The system is divided into four parts: noise analysis subsystem, forecast and simulate subsystem, treatment and control subsystem and second recovery subsystem. The forecast subsystem is based on FGR system, which combines forecast methods of traditional differential equations with data analysis.

[**Key words**] SARS; noise analysis; FGR forecast; treatment matching; second recovery

(cont. from p. 68)

## Application of Porous Aerostatic Bearings in Three-axis Table

Du Jinming  
(*The Third Graduate School, The Equipment Research Institute  
of Second Artillery, Beijing 100085, China*)

[**Abstract**] Aerostatic bearings have been applied widely in aviation, aerospace and precision electronics. Three-axis table is the equipment that has high precision and is used to check, demarcate and establish the error model of inertial system and work-piece. The measurement accuracy is related to the control and navigation in aviation and aerospace school. The equipment's accuracy has influence on the revolution accuracy. Porous aerostatic bearings have higher load capacity, static stiffness and highed damping than other restricted bearings. The paper presents theoretical analysis of porous aerostatic bearings and compares them with orifice aerostatic bearings. The results show the load capacity of porous aerostatic bearings is higher than orifice aerostatic bearings.

[**Key words**] aerostatic bearings; porous; orifice restricted; three-axis table