

# 气体动静压轴承结构参数设计与研究

李丛俭 程 毓

华北机电学校

**摘要:** 对于狭缝节流人字槽气体动静压轴承,其结构参数对轴承静态特性影响较大。对此,通过四因素三水平正交试验,以人字槽宽度 $b$ 、深度 $h_s$ 及狭缝深度 $H$ 、宽度 $z$ 为四因素,以四种参数的三个取值为三水平,构成正交表。采用 Fluent、ICEM、Solidworks 三种软件对正交表各组合的人字槽狭缝节流动静压气体轴承分别建立三维模型、网格划分及仿真分析。通过仿真结果,采用灰色关联分析法对与轴承静刚度、静承载力最为紧密的轴承参数组合及各组参数对轴承静刚度、静承载力的影响程度进行分析,为动静压气体轴承结构参数设计奠定了基础。

**关键词:** 动静压轴承; 正交试验; 结构参数; 灰色理论; 仿真分析

**中图分类号:** TH138 **文献标识码:** B

Design and Research on Structural Parameters of Gas Dynamic and Static Pressure Bearings

**Abstract:** For the herringbone slot aerostatic bearing, its structural parameters have great influence on the static characteristics of the bearing. In this paper, through the orthogonal test of three levels and four factors, with the width and depth of herringbone slot and slit as four factors and three values of four parameters as three levels, the orthogonal table is formed. Fluent, ICEM and SolidWorks software were used to establish three-dimensional model, mesh generation and simulation analysis of the herringbone slot aerostatic bearing. Based on the simulation results, the grey relational analysis method is used to analyze the bearing parameter combination which is most closely related to the static stiffness and static bearing capacity of the bearing and the influence degree of each parameter on the static stiffness and static bearing capacity of the bearing, which lays a foundation for the structural parameter design of the dynamic and static pressure gas bearing.

**Key words:** hydrostatic bearing; orthogonal test; structural parameters; grey theory; simulation analysis

## 引言

动静压轴承具有精度高、稳定性好、抗干扰能力强的特点,广泛应用于测量仪器及精密机床,其润滑方式分为油润滑、水润滑及气体润滑,其中,气体润滑动静压轴承普遍应用于三坐标测量仪、高精密机床等精密设备<sup>[1]</sup>。当前,相关研究者对气体动静压轴承进行了大量研究。王云飞对动静压混合润滑气体轴承的动态设计及稳态设计进行了细致研究,为孔-腔式、缝式、孔式动静压轴承设计奠定了理论基础<sup>[2]</sup>;郭胜安等通过数值计算法及CFD仿真法分别深入研究小孔节流深浅腔动静压轴承的承载性能,验证了数值计算及软件仿真的正确性<sup>[3]</sup>;吴怀超等分别采用有限体积法、遗传算法、有限元法结合正交试验法,优化设计了动静压轴承,为获得最优轴承参数即轴承特性提供了理论指导<sup>[4]</sup>。

基于以上研究,文中深入研究了狭缝节流人字槽气体动静压轴承。该轴承以人字槽为动压槽,狭缝为节流器,综合了人字槽的高速稳定性、功耗低、承载能力强及狭缝节流器气膜内轴向流动干扰低、温度影响小、散射效应小等优。综合正交试验法、Fluent仿真法及灰色关联法,优化了狭缝节流人字槽气体动静压轴承结构参数,提高了轴承静态特性。

## 1 轴承计算模型构建

综合考虑轴承内表面人字槽加工难度大,将转子上加工两列人字槽,如图1所示。

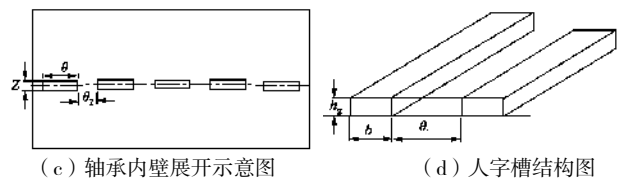
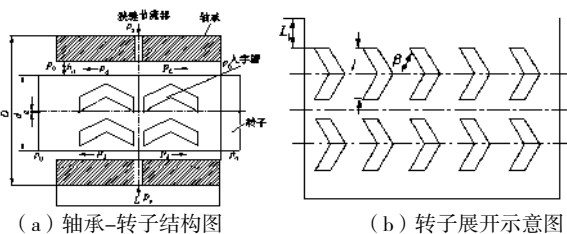


图1 轴承-转子系统图

基于CFD仿真求解,通过Solidworks构建狭缝节流人字槽气体动静压轴承静态特性三维求解模型<sup>[5]</sup>,如图2所示,轴承模型参数如表1所示。

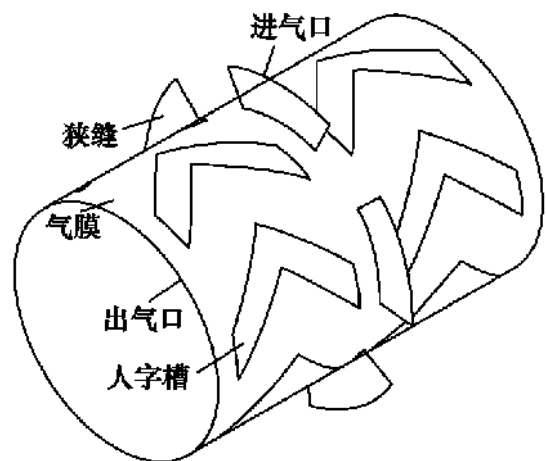


图2 狭缝节流人字槽气体动静压轴承静态特性三维求解模型

表1 轴承模型参数

轴承参数	值	轴承参数	值
轴承长度 $L$ (mm)	70	轴承直径 $D$ (mm)	50
气膜厚度 $h$ ( $\mu\text{m}$ )	10	偏心率 $\mathcal{E}$	0.5
狭缝数量 $m$	6	各狭缝圆心角 $\theta$ ( $^\circ$ )	45

两端狭缝间隔角度 $t$ ( $^{\circ}$ )	15	人字槽与轴承端面距离 $L_1$ (mm)	8
人字槽周向长度 $L_2$ (mm)		螺旋角 $\beta$ ( $^{\circ}$ )	
两人字槽间隔角度 $\theta_1$ ( $^{\circ}$ )	30	人字槽数量 $N$	10

### 2 仿真条件设定及网格划分

人字槽、狭缝及气膜厚度与模型其它尺寸具有较大差距,若一体化网格划分模型,将导致网格畸变,无法确保计算精度。为此,文中通过分区的方式对网格进行划分,将轴承三维流场模型分为人字槽区域、轴承气膜间隙区域及狭缝节流器区域三部分。根据各部尺寸选取网格大小,并对动压槽及轴承气膜处加密处理,人字槽狭缝节流器流动静压气体轴承网格模型如图3所示。

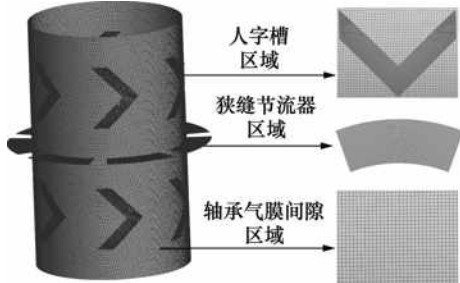


图3 人字槽狭缝节流器流动静压气体轴承网格模型

Fluent 求解过程中的边界条件设定为<sup>[9]</sup>:

- (1) 气体为理想气体,且流动状态为层流;
- (2) 流动过程为绝热过程;
- (3) 出气孔压力设定为大气压,进气口压力为恒值 0.6 MPa,旋转面旋转速度设定为  $1.2 \times 10^5$  r/min。

(4) 选取求解器,并设定求解参数。

完成设置,初始化后开始迭代求解。通过 Fluent 后处理,可直接获得偏心量为  $e$  时的气膜静承载力  $W$ ,此时气膜静刚度  $K$  为

$$K = \frac{W(e + \Delta e) - W(e)}{\Delta e} \quad (1)$$

式中

- $K$ ——气膜静态刚度,  $N/\mu m$ ;
- $W$ ——气膜静态承载力,  $N$ ;
- $\Delta e$ ——偏心量变化值,设定为  $1 \mu m$ 。

### 3 结构优化设计

正交试验法作为常用数理统计方法,通过正交表对多因素试验进行分析,其具有试验次数少、方法简单、效果好、使用方便的特点<sup>[7]</sup>。对于小样本评价问题,灰色关联法的预测性较好,可基于已有数据,获得各方案与最优方案关联度,判别方案优劣<sup>[8]</sup>。综合正交表法及灰色关联分析法,设计轴承结构参数正交表,通过灰色关联分析法分析正交表中数据,进而实现轴承结构参数的优化设计。

#### 3.1 正交参数表设计

动静压轴承性能决定于动压槽及节流器,为此文中将人字槽及狭缝节流器结构作为研究对象,以轴承静刚度及静承载力作为优化目标,选择狭缝深度及宽度、人字槽深度及宽度为四因素,以4种参数的三个不同值为三水平,所设计四因素三水平正交表如表2所示。

表2 四因素三水平正交表

水平	因素	人字槽深度 $h_g$	人字槽宽度 $b$	狭缝宽度 $z$	狭缝深度 $H$
		$A_1$ ( $\mu m$ )	$A_2$ (mm)	$A_3$ ( $\mu m$ )	$A_4$ (mm)
1		5	6	8	16
2		7	8	10	18
3		9	10	12	20

根据上文所述模型建立、网格划分方法及表2所示参数搭建仿真模型,并迭代求解,结果如表3所示。

表3 仿真结果

试验编号	人字槽深度 $h_g$	人字槽宽度 $b$	狭缝宽度 $z$	狭缝深度 $H$	仿真结果 ( $\mu m$ )	
	$A_1$ ( $\mu m$ )	$A_2$ (mm)	$A_3$ ( $\mu m$ )	$A_4$ (mm)	静刚度 ( $K$ )	静承载力 ( $W/N$ )
1	5	6	8	16	93.5	578.15
2	5	8	10	18	97.8	640.2
3	5	10	12	20	92.9	644.7
4	7	6	10	20	103.1	658.7
5	7	8	12	16	99.9	695.3
6	7	10	8	18	110.8	549.3
7	9	6	12	18	87.2	635.4
8	9	8	8	20	91.8	550.3
9	9	10	10	16	97.5	628.8

#### 3.2 灰色关联分析

对表3中数据进行预处理,即

$$x_i^*(k) = \frac{\max x_i^0(k) - x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (2)$$

式中,  $i=1,2,\dots,u$ ;  $k=1,2,\dots,v$ ;  $u$  为试验次数;  $v$  为数据序列参数数量。经预处理,可获得静刚度及静承载力比较序列,如表4所示。

表4 预处理后序列

比较序列	$W$	$K$
参考序列	1.00	1.00

比较序列		
1	0.80	0.73
2	0.38	0.55
3	0.35	0.79
4	0.25	0.32
5	0.00	0.38
6	1.00	0.00
7	0.41	1.00
8	0.91	0.84
9	0.46	0.59

相对于参考序列,对比较序列在第  $i$  点绝对差进行计算,即

$$\begin{aligned} \Delta_{01}(1) &= |x_0^*(1) - x_1^*(1)| \\ &= |1.00 - 0.80| \\ &= 0.20 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{02}(1) &= |x_0^*(1) - x_2^*(1)| \\ &= |1.00 - 0.73| \\ &= 0.27 \end{aligned} \quad (4)$$

根据以上计算方法,可获得各次仿真比较序列与参考序列绝对差  $\Delta_{0i}$ , 如表 5 所示。

表 5 绝对差值

试验序列编号	$\Delta_{0i}(1)$	$\Delta_{0i}(2)$
1	0.20	0.27
2	0.62	0.45
3	0.65	0.21
4	0.75	0.68
5	1.00	0.62

表 6  $k$  点灰色关联系数及灰色关联度

仿真序列	因素				灰色关联度系数		灰色关联度	
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	静刚度	静承载力	灰色关联度值	排序
1	1	1	1	1	0.65	0.71	0.68	3
2	1	2	2	2	0.53	0.45	0.49	7
3	1	3	3	3	0.71	0.43	0.57	5
4	2	1	2	3	0.42	0.40	0.41	8
5	2	2	3	1	0.44	0.33	0.39	9
6	2	3	1	2	0.33	1.00	0.67	4
7	3	1	3	2	1.00	0.46	0.73	2
8	3	2	1	3	0.76	0.99	0.87	1
9	3	3	2	1	0.55	0.48	0.51	6

由表 6 可知, 仿真 8 灰色关联值最大, 即组合 8 中参数与轴承静刚度及轴承静承载力之间关系最为密切, 轴承结构参数为人字槽宽度  $b = 8 \text{ mm}$ ; 人字槽深度  $h_g = 7 \text{ }\mu\text{m}$ ; 狭缝宽度  $z = 12 \text{ }\mu\text{m}$ ; 狭缝深度  $H = 16 \text{ mm}$ 。由表 6 灰色关联度, 获得各轴承参数因素的不同水平的平均灰色关联度, 如表 7 所示。

表 7 轴承参数因素的不同水平的平均灰色关联度

因素	平均灰色关联度			极差
	水平 1	水平 2	水平 3	
A <sub>1</sub>	0.58	0.49	0.70	0.21
A <sub>2</sub>	0.61	0.58	0.48	0.13
A <sub>3</sub>	0.74	0.47	0.56	0.16
A <sub>4</sub>	0.53	0.63	0.62	0.10

根据表 7, 可获得各参数各水平最大与最小灰色关联度之间差值, 差值大小表示该参数对轴承静刚度及静承载力影响情况, 根据不同参数灰色关联度差值比较, 获得轴承不同因素对轴承静态特性的影响程度依次为: 人字槽深度  $h_g$ 、狭缝宽度  $z$ 、人字槽宽度  $b$ 、狭缝深度  $H$ 。

#### 4 结论

通过 Fluent 仿真软件, 综合正交试验法及灰色关联分析法, 对人字槽狭缝节流动静压气体轴承节流器及动压槽结构参数进行优化, 结论如下:

(1) 人字槽狭缝节流动静压气体轴承静刚度及静承载力由狭缝节流器及人字槽共同决定, 动静压轴承设计中应综合考虑节流器及动压槽结构参数。与人字槽狭缝节流动静压气体轴承静刚度即静承载力关系最为密切的结构参数为: 人字槽宽度  $b = 8 \text{ mm}$ ; 人字槽深度  $h_g = 7 \text{ }\mu\text{m}$ ; 狭缝宽度  $z = 12 \text{ }\mu\text{m}$ ; 狭缝深度  $H = 16 \text{ mm}$ 。

6	0.00	1.00
7	0.59	0.00
8	0.09	0.16
9	0.54	0.41

正交试验中, 设定评价各因素参数水平相同, 则权重因子为  $\zeta = 0.5$ , 将该因子带入灰色关联系数及灰色关联度计算中, 即

$$\gamma(x_0^*(k), x_i^*(k)) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \zeta \Delta_{\max}} \quad (5)$$

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(x_0^*(k), x_i^*(k))$$

其中

$$\Delta_{\max} = \Delta_{05}(1) = \Delta_{06}(2) = 1.00$$

$$\Delta_{\min} = \Delta_{06}(1) = \Delta_{07}(2) = 1.00$$

式中,  $\gamma$  及  $\gamma_i$  分别为灰色关联系数及灰色关联度。各次仿真中比较序列及参考序列于  $k$  点灰色关联系数及灰色关联度如表 6 所示。

(2) 狭缝节流器及人字槽结构参数对人字槽狭缝节流动静压气轴承静刚度及静承载力影响程度不同。人字槽及狭缝宽度改变人字槽及节流器节流面积大小, 对轴承静态特性影响不大; 人字槽深度直接影响轴承气膜厚度对轴承静态特性影响最大; 狭缝深度对进入气膜间隙的气体压力影响较大, 对轴承静态特性影响最小。

#### 参考文献:

- [1]刘蕾, 刘保国, 王攀, 等. 液体动静压轴承油膜的应力场和温度场分析[J]. 机电工程, 2019, 36(09): 900-906.
  - [2]王云飞. 气体润滑理论与气体轴承设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
  - [3]郭胜安, 侯志泉, 熊万里. 基于 CFD 的深浅腔液体动静压轴承承载特性研究[J]. 制造技术与机床, 2012, (9): 57-62.
  - [4]吴怀超, 令狐克均, 孙官朝. 基于遗传算法的高速轧辊磨床磨头液体动静压轴承的优化设计[J]. 中国机械工程, 2017, (18): 2495-2500.
  - [5]薛涛, 韩春红. 采摘机器人动力学建模及动作规划仿真研究——基于 SolidWorks[J]. 农机化研究, 2021, 43(12): 65-68.
  - [6]李湘平, 鲁军勇, 谭赛, 等. 基于 Fluent 二次开发的电磁轨道发射运动磁场仿真[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6364-6371.
  - [7]姜苹, 梁海波, 杨彬, 等. 基于正交试验法的故障诊断软件测试方法[J]. 航天控制, 2019, 37(04): 54-58.
  - [8]肖贵坚, 张友栋, 黄云, 等. 基于灰色关联法的航发叶片机器人砂带磨削精度控制技术[J]. 航空制造技术, 2020, 63(09): 63-70.
- 作者简介: 李丛俭, 女, 1970 年 09 月, 专业研究方向: 机电技术应用。