

流体静压主轴

余鸣钟 编著

机械工业出版社

- α —— 锥角
 β —— 节流比
 δ —— 薄膜厚度、气腔深度
 ε —— 相对偏心率
 η —— 润滑剂的动力（绝对）粘度
 η_1 —— 油泵效率
 θ —— 从径向轴承载荷线计起的角度
 θ_1 —— 油腔中心张角之半
 θ_2 —— 油腔中心线与周向封油面远边之夹角
 θ_s —— 内部节流器敏感油腔中心张角之半
 λ —— 设计参数
 μ —— 泊松比
 ν —— 润滑剂的运动粘度
 ρ —— 润滑剂的密度
 τ —— 剪切应力
 φ —— 转轴截面转角、转子轴线角位移
 ϕ —— 空气动力学径向轴承姿态角
 ϕ_n —— 混合径向轴承姿态角
 ω^* —— 涡动频率（涡动角速度）
 ω —— 载荷系数、角速度、同步涡动频率、频率
 ω_1 —— 柱涡固有频率
 ω_s —— 锥涡固有频率
 ω_p —— 额定载荷系数
 Λ_n —— 混合径向轴承压缩数

下标记号

- i —— 第几个...
 l —— 推力轴承诸参数
 15、20、50 —— 摄氏温度为该值时的参数值
 max —— 最大值
 min —— 最小值
 opt —— 最佳值

轴，特别是流体静压主轴，要获得优越的性能必须作为一个系统来考虑。本书从工程实用的观点出发，在简明扼要地阐述流体静压轴承设计分析方法的基础上，以成功的实用设计为例，较系统、详尽地讨论了液体静压主轴、高速液体静压主轴和空气静压主轴的基本理论、机械结构、设计公式、制造及调整方法，并给出了必要的试验、研制数据。为了让更多的人掌握、运用这门新技术，本书尽量避免繁琐的数学推导，仅给出经过简化的计算公式，力求通俗易懂、深入浅出，以期使读者迅速达到独立设计和独立解决制造、调整、维修等方面的主要技术问题的水平，共同为我们的伟大祖国创造更多的财富。本书可供从事流体静压主轴设计、制造、维修和技术改造工作的技术人员、工人以及大专院校有关专业的师生参考。

本书在撰写的过程中曾得到许多单位和个人的大力支持和帮助。北京第一机床厂赵德本同志自始至终对本书的编写工作给予了热情的鼓励和支持，并对本书的初稿进行了认真的审阅，提出了许多宝贵的意见。第一拖拉机厂万人福同志对本书的编写也给予了很多帮助，并对部分书稿进行过审阅。在此一并致以衷心的感谢。

鉴于笔者的水平有限，书中难免有这样或那样的缺点和错误，恳请读者批评指正。

所用符号说明

- A ——面积
- A_s ——反馈滑阀在安装弹簧处的增部面积
- A_e ——径向轴承一个油腔单元的有效承载面积、径向轴承的有效承载面积
- A_L ——轴承的全部封油面面积
- A_P ——轴承的全部轴颈面积
- a ——沟槽的宽度、主轴工作端的悬臂长度
- $\bar{a}$ ——空气静压径向轴承单元宽度
- α_0 ——小孔流量系数
- $\bar{B}$ ——径向轴承长径比
- b_1 ——轴承周向封油面宽度
- b_3 ——回油槽宽度
- C_s ——滑阀控制系数
- C_L ——空气静压轴承的承载系数
- D ——轴承直径
- d ——轴颈直径
- d_c ——毛细管直径、滑阀直径
- d_f ——节流小孔直径
- E ——材料的弹性模数
- e ——轴颈位移
- e_A ——主轴前支承点位移
- e_B ——主轴后支承点位移
- F ——外载荷、轴承径向承载能力
- F_d ——空气静压轴承的几何参数、混合径向轴承中的动压载荷矢量
- F_g ——空气静压轴承的气体特性参数

- F_p ——空气静压轴承的压力参数
 F_s ——混合径向轴承的承载能力
 F_{s_0} ——混合径向轴承的静压载荷矢量
 f ——摩擦系数
 f_e ——主轴系统挠度
 f_1 ——主轴本身弹性变形引起的主轴位移
 f_2 ——轴承油膜刚性引起的主轴位移
 G ——孔式节流空气静压轴承特征函数
 g ——重力加速度
 h ——受载时径向轴承半径间隙
 h_0 ——空载时径向轴承半径间隙
 h_c ——滑阀半径间隙、空载时薄膜与圆台之间的间隙
 h_s ——沟槽轴承节流间隙
 I ——转轴的截面惯性矩
 I_F ——转轴的横向转动惯量
 I_0 ——转轴的极转动惯量
 J ——轴承刚性
 J_A ——主轴前轴承刚性
 J_B ——主轴后轴承刚性
 J_e ——主轴系统刚性
 J_1 ——转轴弹性变形引起的主轴刚性
 J_2 ——油膜（或气膜）变形引起的主轴刚性
 K ——薄膜控制系数
 K_p ——空气静压轴承表压比
 K_h ——联合轴承结构系数
 k ——气体的绝热指数
 k_c ——弹簧刚性、周向环流影响系数
 k_m ——散流扩散系数
 L ——径向轴承长度

- l ——轴承油腔长度、支承间跨距、长度距离
- l_0 ——小孔节流器长度
- l_1 ——轴承轴向封油面（或封气面）长度、支承间距离、长度
- l_2 ——单排内部节流器敏感油腔的封油面宽度、长度
- l_3 ——内部节流器敏感间壁宽度（节流长度）
- l_4 ——内部节流器进油油腔的封油面宽度
- l_5 ——毛细管长度、滑阀节流长度
- l_6 ——特征长度、敏感油腔宽度
- l_7 ——内部节流器进油油腔宽度、沟槽轴承节流长度
- m_p ——转轴的质量
- N ——主轴每分钟的转速
- N' ——主轴每秒种的转速
- N_0 ——总功率
- N_e ——电机功率
- N_f ——摩擦功率
- N_p ——油泵功率
- N_p ——泵功率
- n ——油腔数目、沟槽数目、节流孔数目
- N_1 ——相应于最低固有频率的转速
- N_{ω_1} ——柱涡共振速度
- N_{ω_2} ——锥涡共振速度
- N_s ——涡动起始速度
- N_k ——机械临界转速
- o ——坐标原点
- p ——压力
- p_0 ——环境气压

- P_s ——供油（或气）压力
 P_0 ——空载时油腔压力、空载时节流器出口压力
 P_r ——回油槽中之油压
 Q ——轴承的流量
 Q_0 ——空载时一个油腔流出的流量
 Q_l ——受载时一个油腔流出的流量
 Q_{co} ——空载时节流器流入油腔的流量
 Q_{cl} ——受载时节流器流入油腔的流量
 Q_m ——气体质量流量
 Q_p ——油泵输出流量
 R ——轴承半径、气体常数
 R_A, R_s, R_c, R_D ——推力轴承相应的半径
 $\bar{R}_A, \bar{R}_s, \bar{R}_c$ ——支承反力
 R_n ——雷诺数
 R_n ——滚动比
 r ——轴颈半径、径向距离
 r_e ——薄膜工作范围半径、气腔半径
 r_{c1} ——圆台进油孔半径
 r_{e2} ——圆台半径
 r_0 ——节流孔半径
 T ——绝对温度
 t ——时间、摄氏温度
 $\bar{u}$ ——受载后薄膜平均变形量
 V ——轴颈表面线速度、流动速度
 v_0 ——供气条件下的音速
 W ——重量
 x, y, z ——坐标
 x_c ——滑阀移动距离
 x_1 ——油腔深度
 x_2 ——回油槽深度、排气槽深度

目 录

前言

所用符号说明

第一章 液体静压轴承	1
第一节 液体静压轴承设计概论	1
一、液体静压轴承结构	1
二、液体静压轴承节流器	7
三、液体静压轴承的润滑油	19
四、液体静压轴承材料	23
第二节 液体静压轴承设计的理论基础	24
一、基础方程	24
二、流量公式	29
三、设计参数	39
四、承载能力与刚性	41
五、轴承消耗功率	50
六、分析讨论	52
第三节 液体静压轴承的设计步骤	56
一、径向轴承的设计步骤	57
二、推力轴承的设计步骤	61
三、径向推力轴承的设计步骤	64
四、节流器的设计步骤	68
第二章 静压主轴设计	74
第一节 静压主轴结构构造	74
一、静压主轴的构造	74

二、静压主轴的支承形式	77
三、密封装置	90
四、卸荷装置	92
第二节 静压主轴的刚性分析	95
一、主轴的系统刚性	95
二、主轴的弹性变形	96
三、提高主轴系统刚性的措施	105
四、三支承主轴的刚性	114
五、最小轴承间隙的确定	123
第三章 无心外圆磨床液体静压主轴	126
第一节 静压砂轮轴设计	126
一、两种节流形式的静压卸荷轴	126
二、不采用卸荷装置的静压主轴	136
三、三种设计方案的分析对比	141
四、最佳设计方案的探讨	142
五、设计讨论	147
第二节 静压导轮轴设计	152
一、结构方案的确定	152
二、薄膜反馈节流静压导轮轴	154
三、内部节流静压导轮轴	161
四、设计讨论	167
第四章 外圆磨床液体静压主轴	170
第一节 几种外圆磨床静压主轴	170
一、平面磨床静压主轴	170
二、高速外圆磨床静压主轴	173
三、万能外圆磨床静压主轴	178
四、专用外圆磨床静压主轴	180
第二节 滚道磨床静压主轴	193
一、有周向回油槽的静压轴承主轴	195

二、无周向回油槽的静压轴承主轴	202
三、分析讨论	208
第五章 高速液体静压轴承的设计	213
第一节 高速液体静压径向轴承的设计	213
一、高速液体静压轴承的特点	213
二、高速液体静压轴承设计的理论基础	216
三、高速液体静压轴承的试验	220
四、高速液体静压径向轴承的设计步骤	228
第二节 高速液体静压推力轴承的设计	232
一、高速离心力的影响	232
二、克服离心力的措施	235
三、高速液体静压推力轴承的设计步骤	239
第六章 高速液体静压主轴	242
第一节 液体静压内圆皮带主轴	242
一、主轴结构	243
二、高速液体静压轴承的设计	247
三、试验结果	256
四、使用效果	259
五、分析讨论	261
第二节 内部节流静压内圆主轴	265
一、内部节流静压轴承	265
二、计算数据	275
三、试验结果	279
四、分析讨论	281
第三节 沟槽节流液体静压内圆主轴	289
一、沟槽节流静压轴承	290
二、沟槽节流液体静压轴承的设计步骤	301
三、主轴轴承的计算数据	312
四、设计讨论	317

第四节 液体静压电主轴	320
一、主轴支承形式的确定	321
二、主轴的刚性分析	324
三、主轴轴承的设计	326
四、主轴的结构设计	332
五、试验与使用效果	334
六、设计讨论	339
第七章 静压供油装置	342
第一节 一般静压主轴供油装置	342
一、供油装置的组成	342
二、液压元件及其选择	343
三、油管及管接头	357
四、油及油箱	360
五、JG-80/6静压供油装置	363
第二节 二级闭式油路供油装置	365
一、二级闭式油路柱塞泵	365
二、二级闭式油路供油装置	367
三、二级闭式油路供油装置的性能	371
四、使用场合讨论	372
第三节 高速液体静压主轴供油装置	373
一、液压原理	373
二、强迫冷却	374
第八章 空气静压轴承	381
第一节 空气静压轴承设计概论	381
一、空气静压轴承的特点	381
二、空气静压轴承的结构	382
三、材料的选择	386
四、供气源	390
第二节 空气静压轴承设计的理论基础	391

一、基础方程	391
二、流量公式	394
三、表压比	399
四、轴承的承载能力与刚性	404
五、影响轴承性能的主要参数	417
第三节 空气静压轴承的稳定性	420
一、空气静压轴承的高速稳定性	421
二、高速稳定性的试验	429
第四节 空气静压轴承的设计步骤	443
一、径向轴承的设计步骤	444
二、推力轴承的设计步骤	452
第九章 空气静压主轴	466
第一节 空气静压主轴的设计	466
一、空气静压主轴的支承形式	466
二、主轴结构设计中的一些问题	471
三、高速空气静压主轴的设计	472
第二节 高速空气静压电主轴	476
一、主轴结构	478
二、高速空气静压轴承的设计	480
三、主轴性能参数	485
四、试验结果	485
五、分析讨论	487
第三节 中低速空气静压主轴	488
一、铲磨滚刀用涡轮驱动空气静压主轴	488
二、外圆磨床空气静压砂轮主轴	493
三、设计讨论	496
第十章 静压主轴的制造与调整	498
第一节 液体静压主轴的制造及其工艺	498
一、液体静压轴承的制造及其工艺	498

二、主轴零件的制造及工艺	505
三、节流器的制造及工艺	507
四、壳体的制造及工艺	511
第二节 液体静压主轴的装配与调整	513
一、供油装置的装配与调整	513
二、外圆磨床静压主轴的装配、调整	514
三、内圆磨床静压主轴的装配、调整	521
四、装配、调整时需注意的几个问题	525
第三节 空气静压主轴的制造	528
一、空气静压主轴的制造	528
二、空气静压主轴的装配与调整	529
第十一章 静压主轴的使用与维修	536
第一节 液体静压主轴使用中出现的問題	536
一、供油装置的常見故障及排除方法	536
二、液体静压軸承的常見故障及排除方法	539
三、液体静压軸承节流器的常見故障及排除方法	545
四、主轴常遇的問題及解决的措施	546
五、潤滑油常遇的問題及解决的措施	549
第二节 液体静压主轴的使用与维修	550
一、液体静压主轴的操作規程	550
二、液体静压主轴的維修与大修	552
第三节 空气静压主轴的使用与维修	555
一、空气静压主轴使用中出现的問題	556
二、空气静压主轴的操作規程	558
三、空气静压主轴的維修与大修	559
第十二章 結束語	560
一、靜压軸承的分析方法	560
二、發展中的机床靜压主轴	570
參考文獻	576

第一章 液体静压轴承

机床主轴轴承可以使用滚动轴承，也可使用滑动轴承。滑动轴承的形式较多，一般有以下几种：①静压轴承；②动压轴承；③静动压轴承。

静压轴承又可分成液体静压轴承和气体静压轴承两大类。一般说，液体静压轴承具有较高的刚性，它的转速范围限于 $dN = 0 \sim 2 \times 10^5$ （ N 为每分钟转速； d 为轴颈直径，以毫米计）。机床静压主轴绝大多数都是采用这类轴承。气体静压轴承承载能力较差，而它的速度范围不受限制。超高速主轴多采用空气静压轴承。本章仅讨论液体静压轴承。

静压轴承，更确切地说，应当称之为外部加压轴承。因为轴承与主轴间的润滑膜压力主要是由外加流体压力源供给，借助于节流器来保持稳定的。因此，静压轴承不同于滚动轴承和动压轴承，它除了轴承本身以外，还必须有节流器和供给装置。本章主要讨论液体静压轴承结构参数选择、轴承性能计算及其设计步骤。供油装置放在第七章详细讨论。

第一节 液体静压轴承设计概论

一、液体静压轴承结构

液体静压轴承按承受载荷的方向，可分为径向静压轴承、推力静压轴承和径向推力静压轴承。

（一）径向静压轴承

1. 有周向回油槽的径向静压轴承

该轴承的油腔之间有回油槽，其结构见图 1-1。油腔内的压力油经主轴与轴承间隙，从轴向和周向封油面流出。这种轴承属纯静压支承，受载后，轴颈偏移方向与受载方向是一致的。设计时应保证回油槽内始终充满微量压力油，不然，特别在高速，会将空气吸入轴承。

2. 无周向回油槽的径向静压轴承

该轴承的油腔之间没有回油槽，其结构如图 1-2 所示。

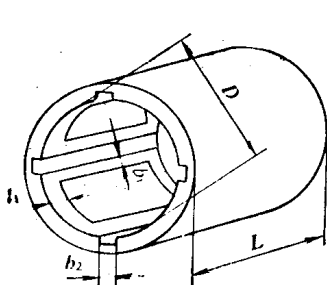


图1-1 有周向回油槽
的径向静压轴承

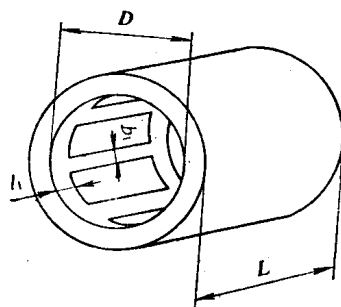


图1-2 无周向回油槽
的径向静压轴承

油腔内的压力油经主轴与轴承间隙，只从轴向封油面流出轴承，因此轴承流量较小。由于受载后各油腔的油液互相流动，产生内流现象，所以，相对于固定节流有周向回油槽的径向静压轴承而言，轴承的刚性较小。如果采用可变节流，只要参数选择适当，仍能获得很大的轴承静刚性。如计及封油面上的动压效应，封油面设计又合理，则能起静动压轴承的作用。所以这种轴承在高速和大的偏心率时，轴承受载后产生的轴颈偏移方向与受载方向是不一致的。显然，这种轴承具有流量消耗小，摩擦面积小，制造简单等优点。

3. 对称等面积油腔径向静压轴承

该轴承的油腔对称分布，各油腔有效承载面积相等。当油腔内充满压力油，主轴不受载且主轴系统自重较轻可以忽略不计时，主轴基本上处于轴承中心位置。机床主轴几乎所有的都是这类轴承。

4. 不等面积油腔径向静压轴承

不等面积油腔，主要是解决特殊要求的负载用的。在内圆皮带主轴中可用来承受较大的皮带拉力，其结构见图1-3。当主轴没有承受外载荷时主轴不在轴承中心，偏在小油腔一边，在皮带拉力作用下方使主轴接近中心位置。

5. 轴承油腔形状

轴承的油腔形状，归纳起来大致有两种：一是矩形油腔；二是油槽形油腔。其结构形式见图1-4。采用油槽形油腔，主轴与轴承之间可接触的面积较大，不易引起轴承精度变化；当供油系统突然停止供给润滑油时，轴承的单位面积受力小，能减少磨损；同时由于挤压膜效应，进一步提高了阻尼作用。但对于同一直径、长度和封油面尺寸的轴承，油槽形油腔较之矩形油腔的摩擦功率大。

对于外圆磨床来说，砂轮

轴轴颈表面线速度一般小于8米/秒，此两种油腔形状均适用。对于低速、重载主轴来说，用油槽形油腔更合适。高速主轴由于主轴转速高，只能用矩形油腔，用油槽形油腔不仅

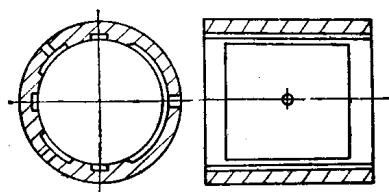


图1-3 不等面积油腔
径向静压轴承

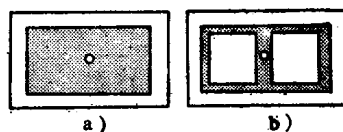


图1-4 油腔的结构形式

a) 矩形油腔 b) 油槽形油腔

温升高，甚至会因油腔压力的急速下降而导致轴承的破坏。

矩形油腔与油槽形油腔在同一直径、长度和封油尺寸的情况下除摩擦功率不同外，有效支承面积相同，两者的设计计算相同。

对于油槽形油腔，轴向油槽形状不限，矩形或V形均可，只要保证油流畅通即可；对于矩形油腔来说，其剖面形状可以是等深度同心圆弧的，也可以是偏心圆弧的。一般来说，前者有效支承面积易控制，散热性好，后者油腔深度较大，在小间隙、高转速时会产生动压效应。其结构见图1-5。

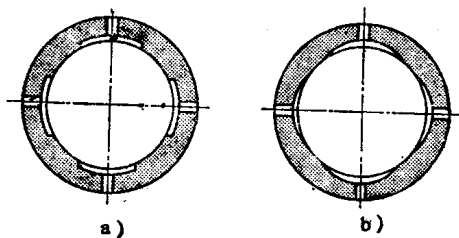


图1-5 油腔剖面形状

6. 油腔数目

机床静压主轴一

a) 同心圆弧结构 b) 偏心圆弧结构

般采用四油腔轴承，它基本上能适应载荷方向有变化的场合，也便于制造。对于高速主轴（当轴颈较小时），考虑到制造与承载能力，一般可采用三油腔轴承。三油腔轴承较四油腔轴承刚性沿周向方向变化大。这两种轴承使用时都应应将油腔设置在正对载荷方向。

对于要求刚性没有方向性的高精度轴承，采用六个油腔结构更合适。

轴承刚性随油腔数增多而增大，三油腔轴承刚性仅为四油腔的 $3/4$ ，四油腔轴承刚性仅为六油腔的 $2/3$ 。

(二) 推力静压轴承、径向推力静压轴承

在机床静压主轴设计中，止推形式的选择是很重要的，特别是对轴向刚性有特殊要求的主轴，如端面立磨、高速切入