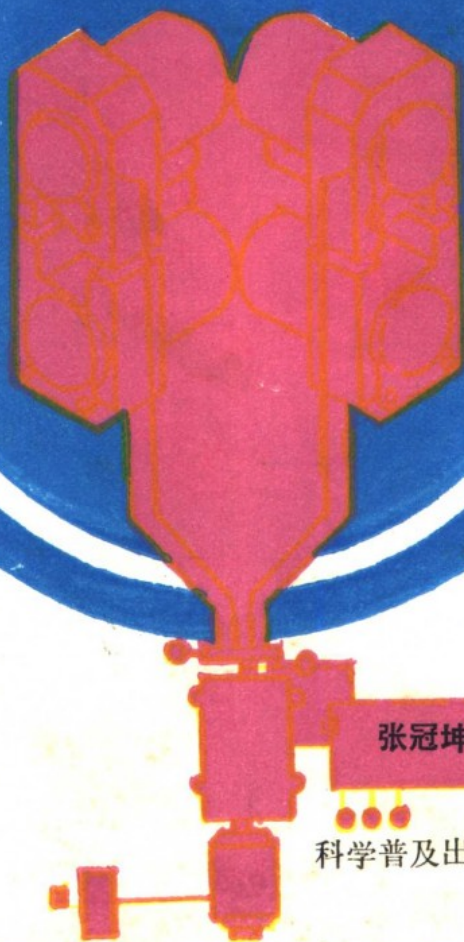


液体动静压轴承

—原理、计算和试验—



张冠坤 钟洪 编著

科学普及出版社广州分社

液体动静压轴承

—原理、计算和试验

张冠坤 钟 洪 编著

科学普及出版社广州分社

内 容 提 要

本书介绍了当今世界先进的液体动静压轴承的设计基本方法和有关的理论计算、实际应用等问题。其中第一章介绍了设计动静压轴承所需要的基础知识、方程和定律；第二章阐述这种轴承的设计方法；第三章介绍适用于大重型机械的动静压轴承的设计计算；第四章对精密或高速的动静压轴承的设计或试验方法进行了较详细的介绍；第五章列举了在国内行之有效的试验方法；更有参考价值的是，在第六章中具体列举了动静压轴承在工业生产中的应用实例，如在磨机、轧钢机、机床、贯流发电机、水轮发电机和线材轧机等的设计、试验实例。本书是我国第一本关于液体动静压轴承设计、计算、试验和应用的专门著作，不仅可作高等院校的教学参考用书，而且可供机械工程技术人员参考。

液 体 动 静 压 轴 承

——原理、计算和试验

张冠坤、钟洪 编著

科学普及出版社广州分社出版发行
(广州市应元路大华街兴平里三号)

广东省新华书店经销

广东惠东印刷厂印刷

787×1092毫米 1/32开本 印张7.125 字数150千字

1988年4月第1版 1988年4月第1次印刷

印数 2800 册

ISBN 7-110-00065-6 / TH·2

定价2.00元

序

机械中凡有转动的部位就需要支承转动的轴。这支承也称轴承。按摩擦性质，轴承可分为两大类：一是滚动轴承，二是滑动轴承。滑动轴承的种类繁多，流体滑动轴承是其中一种，其中又可分为动压轴承、静压轴承和动静压轴承。动压轴承有长久的历史，它的应用研究已超过100年。完全液体摩擦的动压轴承被称为“动压油膜轴承”，也有大半个世纪的历史。静压轴承的原理是早在19世纪发现的，但直至20世纪50年代它才在工业发达国家兴盛起来。

1934年美国第一次在冷轧钢机上采用动压油膜轴承。美国摩根公司第一次将静压润滑加入油膜轴承是在1949年。1955年正式将这个做法应用到产品。我国60年代初从丹麦购进的一台水泥磨机也带有静压润滑系统。这些轴承最早被称为带有静压润滑的油膜轴承，仅为了解决机器起动、尤其是满载起动的困难。

我国广州机床研究所在1974年通过试验研究剖析了动静压轴承。利用电子计算机辅助设计，获得了对动静压轴承的设计方法；并在以后几年的实践中完善了这套设计方法，解决了各种工作状态下的设计计算。并完成了一套系列参数设计。广州机床研究所已将动静压轴承应用到金属切削机床、冷板轧钢机、水泥磨机、煤磨机和立卧式水力发电机组等机械中。

动静压轴承有下面的特点：

(1) 特别适用于大负载大型机械 应用于大负载大型机械的动静压轴承多带有两套供油系统。一套高压小流量系

统用于满载荷起动、制动或减速时。一套低压大流量系统供正常工作时轴承润滑；轴承载荷达1千吨。据1971年统计，美国已有超过70台轧机装配大型动静压轴承。至今美国大钢厂仍欢迎这种型式的轧钢机。苏联于1969年便开始投入第一台自行设计的带大型动静压轴承的轧钢机获成功。这种轴承的另一个好处就是能够使冷板轧钢的轧制速度稳定地达到 30m/s 。我国武汉钢铁公司的1700冷板五连轧钢机亦装备有大型动静压轴承。提供这台机器的联邦德国西马克工厂是美国摩根公司的动静压轴承生产合同户。

在有一些使用场合亦应用一种“高压顶轴系统”，以解决起动瞬间轴与轴承金属摩擦带来的困难。这种轴承不叫“动静压轴承”，因为这种轴承设计时只当作一个动压轴承来考虑。

(2) 动静压轴承工作状态复杂 动静压轴承工作状态有多种。如有二套供油系统的，可以根据需要而开动、停止，或同时工作。轴转动或不转动时轴承均能形成液体润滑。动静压轴承又可当作动压轴承或静压轴承使用，这较之动压或静压轴承的单一工作状态复杂些。

(3) 动静压轴承刚度高 动静压轴承利用了轴承的动压效应因而有高的刚度。与此同时又有比普通动压轴承更高的回转精确度。有一动静压轴承回转精确度达0.6微米，轴承刚度为 $1700\text{N}/\mu\text{m}$ （牛顿每微米）。这点对金属切削机床是重要的。

(4) 动静压轴承结构多样化 动静压轴承设计方法的完整化使得轴承设计灵活。允许轴承的结构多变，以适应不同工作要求。正是这个原因，近年国内在金属切削机床上出现多种不同结构而各有特色的动静压轴承。

(5)已形成一套完整的动静压轴承的设计方法,自具特色

动压轴承和静压轴承已有一套设计方法。动静压轴承的设计方法不同于动压轴承和静压轴承。现已解决了多种工作状态下的动静压轴承设计,又考虑了大型重型机械及精密机械使用动静压轴承的特殊问题。

本书介绍了动静压轴承设计的基本方法和有关的理论计算。全书共分六章。第一章概括了动静压轴承设计需要的基础知识、方程和定律。第二章介绍了动静压轴承的计算方法。计算用无量纲的形式,使计算结果具有通用性。对少数有量纲的量则给出计量名称;例如比热〔热量/(质量·温度)〕。读者计算时可以按国际单位制(SI)导出。第三章考虑动静压轴承弹性变形的计算,适用于大重型动静压轴承的设计计算。第四章适应精密动静压轴承及高速动静压轴承设计试验的需要,主要介绍用锤击法辨识动静压轴承——轴系统的动态特性参数的试验方法。第五章谈到当今国内一些行之有效的、用于动静压轴承的试验方法。第六章列举了一些应用动静压轴承的实例。

广州机床研究所四室从1974年就开始了动静压轴承的研究开发工作,作者是广州机床研究所开发研究动静压轴承工作中的主要成员。在开发研究的过程中,四室的全体同事以及其他一些兄弟单位参加了工作或给予了帮助。作者在此谨向所有这些同事和朋友致以诚挚的谢意。

作者希望此书的发行,将会使动静压轴承的知识得到普及,因而在更多的机械设备中得到应用。

文中如有错漏之处,希读者批评指正。

作者

1987年3月

目 录

序.....	(1)
导 言	(1)
一、轴承的分类.....	(1)
1、全液体摩擦轴承.....	(1)
2、干摩擦轴承.....	(2)
3、半液体摩擦轴承.....	(2)
二、油膜轴承的运行机理和基本 结构形式.....	(3)
1、液体动压轴承.....	(3)
2、液体静压轴承.....	(7)
3、液体动静压轴承.....	(12)
第一章 流体润滑基本理论	(14)
第一节 润滑油的物理性质.....	(14)
一、比重、密度.....	(14)
二、润滑油的粘度.....	(14)
第二节 层流和紊流.....	(21)
第三节 牛顿定律.....	(23)
第四节 平行平板间隙内的粘性流体流动.....	(24)
第五节 小孔内粘性流体的流动.....	(28)
第六节 细长圆管内粘性流体的流动.....	(30)
第七节 流体流动的连续方程.....	(32)

第八节	雷诺方程	(35)
一、	奈维——斯托克斯方程	(35)
二、	雷诺方程	(37)
第二章	动静压轴承工作原理	
	与理论计算	(42)
第一节	动静压轴承工作原理	(42)
一、	什么是动静压轴承	(42)
二、	动静压轴承分类	(44)
1、	按工作原理分类	(44)
2、	按轴承结构分类	(48)
三、	动静压轴承如何工作	(49)
1、	第一类动静压轴承	(49)
2、	第二类动静压轴承	(49)
3、	第三类动静压轴承	(50)
第二节	动静压轴承理论计算	(51)
一、	数值计算的差分方法	(51)
二、	轴承间隙计算公式	(52)
三、	雷诺方程及其无量纲差分形式	(53)
1、	无量纲的雷诺方程	(54)
2、	雷诺方程的差分形式	(55)
四、	雷诺方程的边界条件	(56)
五、	电子计算机辅助计算	(59)
1、	数值解雷诺方程	(59)
2、	超松弛迭代法	(60)
六、	流量连续方程的差分形式	(61)
七、	在四种工作状态下动静压轴承	
	的理论计算	(63)

八、承载力及偏位角计算.....	(65)
九、流量计算.....	(66)
十、摩擦功耗计算.....	(69)
1、转动轴剪切油膜的剪切应力	
计算公式.....	(69)
2、计算摩擦力公式的差分形式.....	(70)
十一、润滑油温升计算.....	(71)
十二、动静压轴承理论计算流程框图.....	(74)

第三章 考虑轴承弹性变形的

理论计算..... (75)

第一节 动静压轴承巴氏合金层接

触变形的计算..... (76)

一、弹性力学中的平面接触问题..... (76)

二、相对变形位移概念..... (78)

三、用差分法计算巴氏合金层接触变

形的公式..... (89)

四、巴氏合金层的接触变形对轴承

性能的影响 (101)

第二节 动静压轴承轴的弯曲变形计算 (104)

一、全自位轴承 (104)

二、全不自位轴承 (105)

三、轴的挠度对轴承性能的影响 (105)

四、考虑轴的弯曲变形的

动静压轴承计算过程 (108)

1、全自位轴承 $F(j)$ 的确定 (108)

2、全不自位轴承 $F(j)$ 的确定 (108)

3、计算方法 (109)

第三节	中空轴热弹性变形的计算	(110)
一、	数学模型的建立	(110)
二、	基本方程及边界条件	(112)
1、	热传导方程和温度场函数	(112)
2、	应力应变方程及位移函数	(114)
第四章	动静压轴承的动态特性	(123)
第一节	基本知识	(123)
第二节	计算动静压轴承油膜动态 特性系数的方程	(127)
一、	线性轴承油膜动力学数学模型	(127)
二、	计算线性轴承油膜动态特性系 数的优化方法	(131)
第三节	动静压轴承动态特性试验技术 与所需设备	(133)
一、	试验所需设备	(133)
二、	锤击激振法的试验技术	(136)
第四节	油膜的动力稳定性	(140)
一、	失稳问题	(140)
二、	稳定性判别	(142)
第五章	动静压轴承的试验 研究	(146)
第一节	相似问题	(147)
一、	力学相似的条件	(147)
1、	几何相似	(148)
2、	运动相似	(148)

3、动力相似	(149)
4、边界条件和起始条件相同	(149)
二、动静压轴承力学相似准则	(149)
1、动压轴承的相似准则	(150)
2、动静压轴承相似准则	(153)
三、动静压轴承力学相似准则的应用	(161)
第二节 试验装置和供油系统	(164)
一、试验装置的基本结构方案	(165)
1、加载方式及驱动方式	(165)
2、测量装置	(167)
3、自位垫	(169)
二、供油系统	(172)
第三节 测试方法	(172)
一、油膜压力分布的测试方法	(172)
1、用压力表测量	(173)
2、用电阻应变片式传感器测量	(174)
二、油膜厚度的测量	(177)
1、接触式测量	(177)
2、非接触式测量	(177)
三、流量测量	(185)
四、温度测量	(188)
1、进油温度的测量	(188)
2、回油温度的测量	(188)
3、油膜温度场 $T(\theta)$ 的测量	(189)

第六章 动静压轴承在工业生

产中的应用

(190)

第一节 动静压轴承在磨机上的应用

一、磨机现用滑动轴承的分析	(190)
三、磨机用动静压轴承	(191)
三、电气联锁要求	(192)
四、磨机应用动静压轴承的效果	(194)
1、磨机中空轴静态浮升量	(194)
2、磨机起动功耗和起动转矩的变化	(194)
3、轴承寿命的比较	(195)
第二节 动静压轴承在轧钢机上的	
应用	(195)
第三节 动静压轴承在机床上的应用	(199)
第四节 10000千瓦灯泡贯流发电机	
组上应用的动静压轴承	(202)
第五节 立式水轮发电机组上应用	
的动静压推力轴承	(204)
第六节 动静压轴承在线材轧机上	
的应用	(205)
参考文献	(208)

导 言

一、轴承的分类

轴承是机械设备中不可缺少的重要零件。目前，轴承结构形式、规格品种繁多。

按摩擦性质，轴承可分为两大类：滚动轴承和滑动轴承。其中按润滑剂又可分流体滑动轴承、油脂润滑滑动轴承及固体润滑滑动轴承。

流体滑动轴承中依轴承运行时的摩擦状态可分为：全液体摩擦轴承、干摩擦轴承和半干摩擦轴承。

1、全液体摩擦轴承

这种轴承在运行时，滑动表面完全被流体润滑剂隔开。故这类轴承又称为油膜轴承，其摩擦只表现为流体润滑剂的内摩擦现象。因此，这类轴承的摩擦系数一般只与润滑剂的粘度有关。其摩擦系数是滑动轴承中最小的，摩擦系数一般在 $0.001\sim 0.008$ 之间。

常见的动压轴承、静压轴承和动静压轴承都属这类轴承。

由于这类轴承的滑动面完全为润滑剂隔开，而润滑剂在轴承内只有薄薄的一层膜，人们一般称润滑剂为润滑油，故这类轴承又被统称为油膜轴承。

油膜轴承的滑动表面之间要有油膜，故轴承与轴的配合

是有一定间隙的，而且间隙的大小直接影响油膜轴承的运行特性。

2、干摩擦轴承

滑动表面间没有润滑剂，轴承运行时摩擦表现为两固体表面之间的摩擦现象。其摩擦阻力的大小完全取决于轴承材料的性质。但它不需供油装置，随着新型减磨材料的出现（如工程塑料轴承等），依然很有前途。

3、半液体摩擦轴承

这种轴承在运行过程中，滑动表面被流体润滑剂部分地隔开，而仍然有一些固体表面的接触，所以有人又称这种轴承为半干摩擦轴承，或叫边界摩擦轴承或边界润滑轴承。

由于这种轴承运行过程中有固体表面的摩擦情形，因此，在运行中，固体接触部分必然很快被磨损掉，使接触面积越来越大，逐渐跑合，所以这类轴承又叫跑合轴承；另一方面，这类轴承是要逐渐跑合的，故轴承在运行中就不可能有间隙，所以又叫无间隙轴承。

由于这类轴承尚有一定的使用寿命，而且又不需要专门设置供油系统，或者供油系统非常简单，故在一些低速场合仍常采用。如球磨机、榨糖机中，目前仍常采用这种轴承。

半液体摩擦轴承的摩擦既表现为两固体表面的接触摩擦，又表现为流体润滑剂的内摩擦，因此其摩擦阻力比干摩擦轴承小，而又比全液体摩擦轴承大，摩擦系数一般在0.1~0.3之间。由于其摩擦系数比全液体摩擦轴承大10~100倍，从节能的角度考虑是很不合适的，随着润滑系统技术的

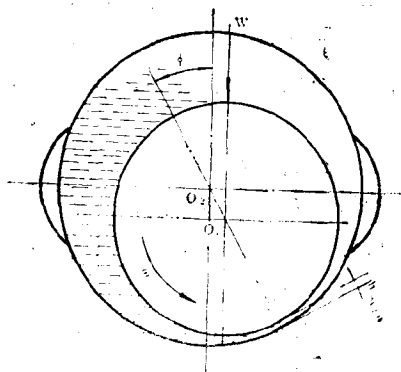
发展，在有可能的场合，这种半液体摩擦轴承也将逐渐为全液体摩擦轴承所代替。

二、油膜轴承的运行机理和基本结构形式

1、液体动压轴承

(1) 液体动压轴承的运行机理

如图(1)所示，是一动压轴承运行时的状态示意图。 O_1 是轴的中心， O_2 是轴承内孔的中心，当 O_1O_2 重合时，轴和轴承间有一间隙 h_0 ，我们称 h_0 为初始间隙或叫设计间隙。轴承运行时，轴以角速度 ω 旋转，在载荷 W 的作用下，轴心 O_1 和轴承中心 O_2 相互偏离，我们称 $e = O_1O_2$ 为偏心距， $\overline{O_1O_2}$ 连线为偏心线。 O_1O_2 与载荷 W 的夹角 ϕ 称为偏位角。润滑油从



图(1) 动压轴承运行机理示意图

供油系统中进入油腔内。由于润滑油具有粘性，润滑油将随轴旋转进入间隙内，顺着旋转方向，间隙越来越小，润滑油

被挤压，而产生压力，直到间隙最小处，润滑油被挤得越来越厉害，油膜压力因而越来越大，这些油膜压力的总和就形成轴承的承载力与外载荷 W 平衡。经过间隙最小 $h_{\min}$ 处后，间隙越来越大，润滑油不再被挤压，油膜压力因而消失。在有些场合，在此区域甚至会出现真空而使油膜破裂。因此，人们又常称此区域为油膜破裂区。

从粘性流体力学的角度来看，流体动压轴承的运行机理就更好说明。

当润滑油随轴旋转时，从轴表面至轴承表面间，油膜的各层间有一个速度梯度，因而层与层之间会产生剪切应力，在剪切应力作用下就会形成油膜压力，这些油膜压力作用在轴上的总和形成轴承的承载力以平衡外载荷。

这就是所谓油楔效应。图(1)中所示的轴承只有一个油楔，故又叫单油楔轴承。在一些液体动压轴承中，为了某些特殊的要求，专门使油楔的个数不止一个，就叫多油楔轴承。

从上面动压轴承的运行机理中，我们可以看到动压轴承的一些特点：

- ①具有一定的初始间隙 h_0 ；
- ②所用的润滑油有一定的粘度；
- ③轴表面和轴承表面有一定的相对速度；
- ④工作时，有一个偏心距。

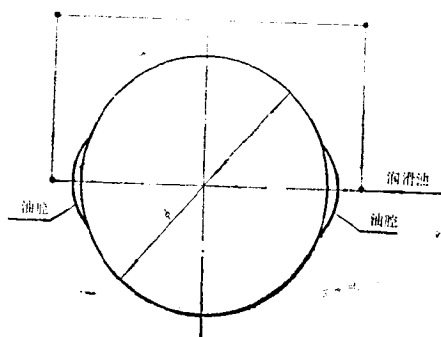
这四个基本特征中，少了任一项都不能形成动压效应，因而也就不成为动压轴承。

(2) 径向动压轴承的基本结构形式

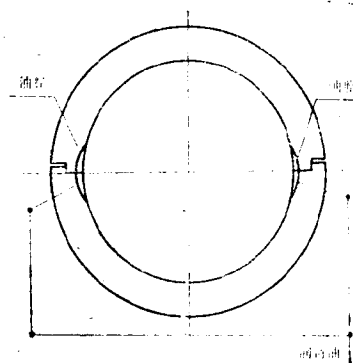
①全圆轴承

如图(2)所示为一个全圆动压轴承。其结构特点是轴承的横截面除开二个油腔外，就是一个圆。两个油腔的作

用是通入润滑油。从供油系统来的润滑油不断进入油腔，以保证轴承间隙内充满润滑油。这种轴承的轴就是一个圆柱体或叫圆形光轴。



图(2) 全圆动压轴承结构示意图



图(3) 剖分式全圆轴承结构示意图