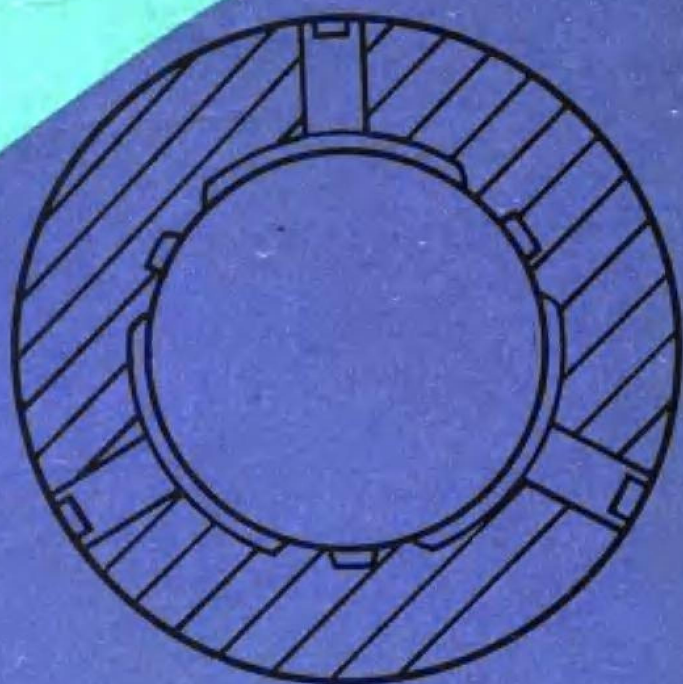


静压技术在 机床改造中的应用

中国机械
工程学会 设备维修学会 编



2.16

机械工业出版社

本书包括液体静压支承的制造工艺、应用实例、供油装置以及静压支承的维护与修理等五部分内容。着重介绍利用静压技术改造外圆磨床、内圆磨床、平面磨床及其它机床的四十余个成功实例，每一实例都附有图纸及主要参数，可直接利用。本书实用性较强，可供工程技术人员改造老旧机床时参考。

静压技术在机床改造中的应用

中国机械
工程学会 设备维修学会 编

责任编辑：冯永亨 温莉芳

封面设计：刘 代

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 8 · 字数 189 千字

1988年7月北京第一版·1988年7月北京第一次印刷

印数 0,001—3,500 · 定价：2.50元

ISBN 7-111-00563-5/TG · 147

序

机床运动部位支承的好坏，在相当大的程度上决定着机床的性能和质量。采用静压技术的轴承、导轨等支承所具有的许多优点，已逐步被人们所认识，并受到机床制造业与修理业的重视。从本世纪五十年代开始，我国在机床制造与修理改装中就尝试利用静压支承，到六七十年代，这方面获得了较快的发展。在改装、修理旧机床，恢复和提高机床精度，提高旧机床生产率方面，采用静压轴承和导轨的效果显著、发展迅速。

上海机床厂、成都量具刃具厂、洛阳第一拖拉机厂等在设计、应用静压支承上积累了丰富的经验。天津大学、北京航空学院、哈尔滨工业大学、郑州工学院等高等院校也开展了对静压支承理论和设计计算方法的研究。广州机床研究所不但对静压支承的理论和计算做过深入的研究，而且为静压轴承的系列化做了大量工作，为扩大使用静压支承做出可贵的贡献。

在我国机械行业的机床拥有量中，五六十年代生产的机床占有很大比例。利用新技术将这些机床加以改造，提高其精度和性能，对于实现设备现代化有重大的现实意义。中国机械工程学会设备维修学会为了协助全国维修工人、技术人员迅速掌握静压技术，把静压支承用到设备修理改造中去，组织了一些从事这方面工作多年的同志，在不长的时间里收集了利用静压支承改装旧机床的四十多个成功实例，经过分析和整理，编辑成书。它不但展示出静压支承的许多优点，而且证明静压支承能广泛应用于机床改装，是提高机床精度和性能的有力措施之一。

为便于读者借鉴和探讨技术问题，书中每个实例都给出主要数据和注明资料来源。读者若有问题，可随时同原设计者联系解决，也欢迎与本书编者商榷。

参与本书选编的有：赵德本、卜炎、余鸿钧、贺伟超、武弘毅、万人福、王腾芳、严新锐、姜涛等同志，全书由卜炎同志整理定稿，顺此说明。

中国机械工程学会设备维修学会

1986年夏

目 录

一、概述.....	1
二、液体静压支承的制造工艺.....	5
1. 主要零件的加工工艺	5
2. 装配与调试	9
三、实例应用.....	12
1. 外圆磨床的改装	12
2. 内圆磨床的改装.....	44
3. 平面磨床的改装	65
4. 其它机床的改装.....	79
5. 机床导轨和辅助支承的改装	98
四、供油装置	109
1. 概述	109
2. 供油系统的组成	109
3. 供油系统的应用举例	112
五、静压支承的维护与修理	118
1. 维护规程	118
2. 修理方法	118
3. 常见故障及其排除方法	119

一、概 述

摩擦副间的摩擦和磨损是轴承、导轨中的主要问题。除了采用物理的或机械的方法之外，绝大多数情况是采用各种润滑措施来降低摩擦，减少磨损。

降低轴承功耗，延长轴承使用寿命，对节约能源、提高经济效益有重大影响。目前，机器日益向大型、重载、高速、精密、高效率等方向发展，轴承往往成为制造这些机器的技术难题之一。

从摩擦学的角度看，解决支承的摩擦磨损问题，一般采用在摩擦副中加入边界膜、流体膜、固体膜以及滚动体法，或是采用磁悬法。加入边界膜、流体膜、固体膜的方法统称为润滑。在金属切削机床中，主要轴承最常采用的是加入滚动体（滚动轴承）和流体膜（滑动轴承）的方法。

如何能在摩擦副间形成一层能承受一定载荷的流体膜呢？根据理论研究和实际应用证实，能用两种方法建立流体膜。一种是依靠流体的粘性及摩擦副间表面构成的收敛楔形产生流体动压力，称为流体动力润滑，相应的轴承称为动压轴承。一种是依靠从外部送入压力流体，利用流体的静压力，称为流体静力润滑，相应的轴承称为静压轴承。

利用流体静力润滑膜解决摩擦学问题，称为流体静压技术，它是一种比较新的技术。但是，追溯它的历史，首先提出静压轴承设想却早在1862年（L. D. Girard），而且在B. Tower首次观察到轴承中流体动压力（1883年）之前。1917年Lord Rayleigh发表文章，给出了液体静压止推轴承承载量、流量和摩擦力矩的计算公式。1938年美国加利福尼亚州Palomar Mount天文台的200英寸天文望远镜采用了液体静压轴承，此天文望远镜总重500 t，驱动它旋转（每昼夜一转）的功率只要0.06kW。1948年法国首先把液体静压轴承用于磨床，Gendron公司采用可变节流方式控制轴心位置，制造出能磨出带0.13mm凸度的轧辊磨床。直到本世纪五十年代，它的应用才比较广泛，并在理论上和应用技术上作了大量深入的研究，所以我们说它是一种比较新的技术。

静压技术从理论上来说，可以用于摩擦学的各个领域。采用静压技术最典型的三种摩擦副是轴承、导轨和丝杠（蜗杆），统称为静压支承。

静压支承系统由承导件（轴瓦、导轨）、运动件（轴颈、工作台）、补偿元件（节流器、定量阀）和供油装置四部分组成。在静压支承中，流体由泵加压，经节流器送入承导件与运动件之间，然后再经两者之间的缝隙流出（或称为二次节流），压力降至环境压力，流回油池重新进入油泵，完成一个循环。由环境压力包围的承导件（或者运动件）上的区域称为油垫。在油垫中凹入的部分称为油腔。包围油腔的平面称为封油面。一个支承可以是一个油垫，也可以由多个油垫组成，相应地称为单垫式支承和多垫式支承。在一个油垫上可以有一个油腔，也可以有多个油腔，相应可以分为：单垫多腔式、多垫单腔式、多垫多腔式等。对轴承来说，把多垫单腔式称为垫式轴承，把单垫多腔式称为腔式轴承。在我国，大多数机床厂家采用四油腔带轴向回油槽的径向轴承，因为回油槽内是环境压力，所以这种轴承属于多垫单腔式的垫式轴承。

垫式轴承的优点是各油腔之压力油互不串通, 不会起压力“均衡”作用, 所以在静止或低速时承载能力略高于腔式轴承。但是垫式轴承由于封油面小, 环境压力包围的边界长, 故流量大, 因而泵功耗也大。从节能角度出发, 采用腔式轴承更为有利, 而且, 如果计入在转子转动时的动压效应, 腔式轴承的承载能力和刚度并不比垫式差。另外, 腔式轴承还没有从回油槽吸入空气的危险。从国外的使用情况来看, 采用腔式轴承的较多, 但在国内采用腔式的较少。

补偿元件是静压支承中一个极重要的组成部分, 它的流量补偿性能决定着静压支承的性能。原则上说, 凡是对流动形成阻力的元件都可作为补偿元件, 例如各种节流器和定量阀(泵)。通常按流体流过节流器的流动特性将节流器分为小孔、毛细管和缝隙节流器。流体通过这三种节流器的流量公式分别为:

$$q_i = \frac{\pi d_j^2 a}{4} \sqrt{\frac{2(p_s - p_o)}{\rho}}$$

$$q_i = \frac{\pi d_j^4}{128 l_j} \frac{p_s - p_o}{\eta}$$

$$q_i = \frac{b_j h_j^3}{12 l_j} \frac{p_s - p_o}{\eta}$$

式中 d_j ——节流器孔径; l_j ——流体流过长; b_j ——节流器垂流方向的宽度; h_j ——节流器缝隙高度; ρ ——流体密度; η ——流体粘度; p_s ——供油压力; p_o ——节流后压力; a ——流量系数。

这三种节流器在工作时节流尺寸是固定的, 称为固定节流器。还有节流尺寸自动调节的可变节流器, 常用的有三种, 即薄膜反馈、滑阀反馈和内部(位移敏感)节流器, 它们都是靠缝隙节流的。

采用这些节流器时必须保持恒定的供油压力, 只是通过节流器的流量有所不同, 所以称为定压供油方式。还有一种供油方式是通过定量泵或阀向每一个油腔供给一定量的流体, 而供油压力可以改变, 这就是定量供油方式。可以把定量泵或阀称为补偿元件。采用这种供油方式的支承, 其刚度比用固定节流器的好。

静压支承在最近二、三十年获得比较广泛的应用, 因为人们认识到它有许多优点, 也由于生产与技术的发展对支承提出了更高的要求。静压支承的优点有:

1) 低速性。动压支承在机器启动、停车的低速阶段, 由于不可能形成完整的流体膜而处于边界润滑状态, 因而摩擦副表面会出现磨损。这对于需要在低速下运转的机器或仪器, 就完全无法利用动压支承了。静压膜的建立与速度无关, 因此不但在启动与停车阶段照样有流体膜, 就是完全没有相对运动的支承也能保持完整的流体膜。前面举出的天文望远镜是利用静压支承低速性的典型实例。

2) 无爬行。滑动摩擦的动、静摩擦系数值相差较大, 是造成工作台低速爬行的主要原因之一。流体膜将承导件与运动件完全隔开, 把摩擦转变为流体的内摩擦, 动、静摩擦系数是一样的, 因而静压支承无论速度多低也不会出现爬行。这对精密磨床导轨来说是十分有用的优点。

3) 高刚度。我们知道, 动压轴承轴颈中心位移与承载量的关系如图 1-1 中实线所示, 曲线某点的斜率就是轴颈在该位置的油膜刚度。由图 1-1 可知, 轴承只有在偏心率为较大值时方有高的刚度。此时, 由于偏心率大, 最小油膜厚度值就小, 因此要想获得高的刚度, 必

须使轴承在大偏心率下工作, 轴承也就必须有高的精度。静压轴承的 $F-\epsilon$ 曲线如图 1-1 中虚线所示。它与动压轴承相反, 在小偏心率下有高的刚度, 所以特别适用于在小偏心率下工作的机器。这时 ϵ 值小, $h_{\min}$ 值大, 即油膜厚, 因而轴瓦和轴颈的几何精度可以低一些, 粗糙度 R_a 值可以略大一些。

4) 均化效应。滚动支承是靠滚动体与滚道接触传递载荷、确定轴颈位置的, 因此, 滚道的几何形状直接影响轴颈的位置, 轴颈的回转精度一般低于滚道的精度。动压轴承的轴颈中心位置由外载荷与油膜压力的合力平衡所决定, 而油膜压力分布受轴颈和轴承的几何形状的影响极大, 所以几何形状的偏差也就直接影响轴颈的回转精度。静压支承的轴颈位置也是由外载荷与油膜压力的合力平衡所决定, 但油膜力由流量平衡决定。通过一个油垫的流量只与这个油垫与轴颈之间间隙的平均值有直接关系, 几何误差对流量影响甚微。因此, 静压支承运动件的运动精度 (回转精度、工作台运动精度) 将高于摩擦副表面的几何精度。这一作用就称为均化效应。实践证实, 主轴在静压轴承中的跳动能小到只有主轴轴颈圆度误差的 1%, 直线运动误差可以只有导轨直线度误差的 20~25%。这一点极为重要, 它表明可以利用支承来提高机床的加工精度, 在改造老机床方面可以发挥重要作用。

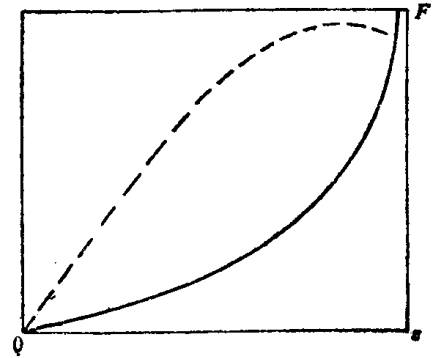


图1-1 动压、静压轴承的 $F-\epsilon$ 曲线

5) 高稳定性。转子支承在动压流体膜上, 轴颈中心一定偏离轴承几何中心一个距离, 而且偏离方向与载荷作用方向不同, 成一角度 ϕ , 称为偏位角。也就是说, 在载荷作用下轴颈不是沿载荷作用方向移动, 而是向偏离某一角度的方向移动。由于这个原因, 在某些状态下, 主轴除绕自身轴线回转外, 主轴轴线还绕某一轴线作公转, 称为涡动。因为在临界转速之内这个涡动的频率接近自然频率的一半, 故亦称为半速涡动。偏位角愈大 (载荷较轻时), 出现半速涡动的转速愈低。对静压轴承来说, 如果不考虑动压效应, 则偏位角 ϕ 始终为零, 所以应该是天然稳定的。当然, 支承在静压轴承中的转子, 只要转动, 总会有动压效应, 偏位角不可能为零, 所以也可能出现半速涡动, 但出现半速涡动的转速比动压轴承高得多。这一特性对降低磨削表面粗糙度是很重要的。

6) 轴心位置可以控制。人为控制静压轴承各个油腔节流器的节流尺寸, 改变它的流动阻力, 就能控制油腔内的压力, 达到控制轴心位置的目的。同时, 由于静压轴承的间隙可以大一些, 因此, 轴心位置能具有一定的调节范围。把这一原理用于磨头, 可以在磨削过程中控制砂轮的位置。前述法国 Gendron 公司的轧辊磨床就是应用这一特点的典型实例。如果用于导轨磨床, 就能磨出带一定凸度或凹度的导轨。

7) 高速性。前面说过静压支承有良好低速性, 同时它也适应高速。由节流器及支承间隙内的流量公式可知, 静压支承除小孔节流外, 其承载能力与粘度无关, 当采用高供油压力、低粘度流体时, 既可获得大的承载能力, 又可减小摩擦功耗, 因而温升较低。动压支承虽然也是流体膜, 但承载量与粘度成正比, 流体粘度将由承载量决定。另一方面, 为了保证动压支承有足够的刚度, 其间隙值一般比较小, 而且工作时偏心率较大, 因而最小油膜厚度也较小, 这样速度梯度就大, 而摩擦功耗与速度梯度成正比, 故动压支承摩擦功耗较大。静压支承不但油膜厚度较大, 而且在油垫上开出油腔 (油腔处油膜厚得多), 因此它的摩擦

4

功耗比动压支承低得多。温升是高速轴承的主要障碍之一，或者说温升是限制轴承速度的主要因素之一。因此，可以说静压支承适宜用于高速场合。

8) 良好的工艺性。由于静压支承的油膜厚度较厚，又具有均化效应，所以在制造静压支承时，无论是加工精度或是表面粗糙度方面的要求，在机器要求精度相同的情况下，均可低于动压支承。从国内工艺水平来看，一般机械制造厂在制造精密级机床的静压支承上，都不会有什么工艺困难，但在制造动压支承上，有些工厂就有较多的困难。

9) 高寿命。从理论上讲，静压支承的寿命是无限的。实际上，只要使用得当，寿命可以很长。从国内使用情况来看，有许多一对轴承使用十余年尚未见磨损痕迹的实例。

10) 对材料无特殊要求。动压支承因避免不了边界摩擦，故对制造轴瓦表面的材料提出了一些特殊的要求，例如减摩性、耐磨性、顺应性、嵌藏性等。为满足上述要求通常采用青铜、巴氏合金、铝锡合金等材料制造轴承衬或轴瓦，这样要消耗大量有色金属。静压支承因摩擦副两表面始终不接触，故没有这些要求。国内不少单位已成功地采用铸铁作轴瓦，有些单位考虑故障时的防护而采用锡青铜作轴瓦不过材质要求也可低些。

当然，静压支承也有缺点，它的应用也受到一定的限制。第一个缺点就是静压支承需要一个供油装置，既增加了制造成本，又增加了机床占地面积；同时，油泵要消耗能量，因而与其它轴承作比较时，应考虑泵功耗加摩擦功耗的总功耗。第二个较大的缺点是油腔位置布置不好时，四油腔（垫）静压轴承的刚度在较大偏心率时会转变为负值，所以这种轴承不能用于大偏心率，同时也应说明，这样安装的四油腔（垫）静压轴承过载能力很差。如果布置恰当，这一缺点可以消除。

为了克服泵功耗大、供油装置尺寸庞大的缺陷，人们正在探索改进的措施。减少支承流量，不但能降低泵功耗（ $N_p \propto p \cdot q$ ），而且也能减小供油装置尺寸。通常，采用腔式轴承能减少流量，适当提高精度减小轴承间隙，能更多地降低流量（ $q \propto c^3$ ）。目前已有把供油装置减小到不超过主轴箱尺寸、利用主轴箱作为供油箱的磨床出现。

对于轴旋转的静压轴承，如果能充分利用其产生动压效应的能力，以提高承载能力和刚度，是一个非常好的现实的设想，于是出现了所谓动静压混合轴承。从原理上讲，任何旋转轴的静压支承均有动压效应。不同结构的静压轴承，其动压效应所占分量就不相同。目前，什么样的轴承才算为动静压混合轴承还没有一致的、明确的看法。

上述两个方面的探索与研究也说明静压技术还有待于进一步发展和提高，并向人们展示了静压支承的发展前景。

二、液体静压支承的制造工艺

液体静压支承主要由运动件（通常是轴和工作台）、承导件（通常是轴承和导轨）、补偿元件和供油装置等四部分组成。

对静压轴承来说，运动件一般是轴，构成摩擦副的部分是轴颈（径向轴承）或止推环（止推轴承）；承导件是轴承，通常油腔开在轴承上，所以静压轴承的轴颈和止推环与动压轴承的没有什么不同。静压轴承上的油腔数一般最少为3，个别止推轴承也有用单腔或双腔的。对静压导轨来说，通常油腔开在工作台上，油腔的数目和布置视具体结构而定。油腔深度可取为 $(30\sim60)h_0$ 。

供油装置分为定压供油系统和定量供油系统，在本书第四节作详细介绍。

在采用定压供油系统时，补偿元件称为节流器。采用毛细管、小孔，缝隙节流器的场合，每个油腔具有一个节流器。采用双面薄膜和滑阀反馈节流器的场合，对称的两个油腔采用一个节流器。

1. 主要零件的加工工艺

（1）轴承加工工艺

图2-1 是一典型静压轴承结构。轴承材料为球墨铸铁或耐磨铸铁。加工工艺如下：

- ① 粗车毛坯：全部留精车余量3mm；
- ② 热处理：时效，消除内应力；
- ③ 精车：留磨削余量，孔留余量0.6mm，要求大端面与孔垂直；

④ 精加工油腔：加工方法主要有两种：（A）用铲齿车床铲油腔，这种方法简单、效率高、精度高，只要根据油腔尺寸配做一只凸轮，图2-2是铲挖油腔的示意图；（B）用镗床或铣床加工，将刀具回转中心偏离轴承中心铣出油腔，油腔成弧形（见图2-3）。刀具偏心距可根据油腔最大深度 t 和油腔半角 θ_1 来计算。如图2-3所示，刀具偏心距

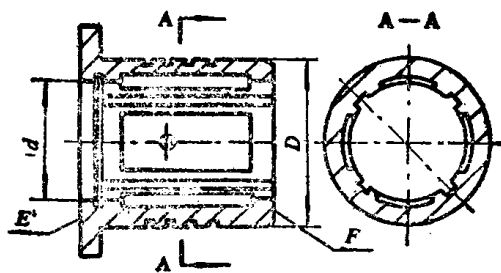


图2-1 典型静压轴承结构图

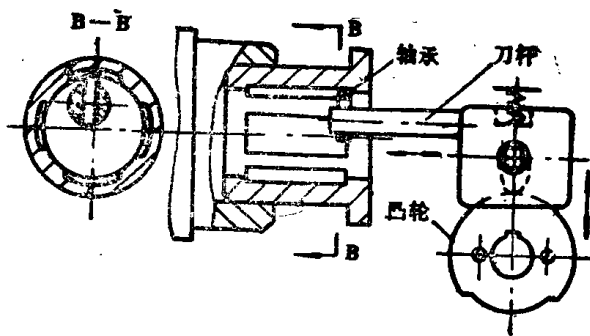


图2-2 在铲齿车床上加工油腔

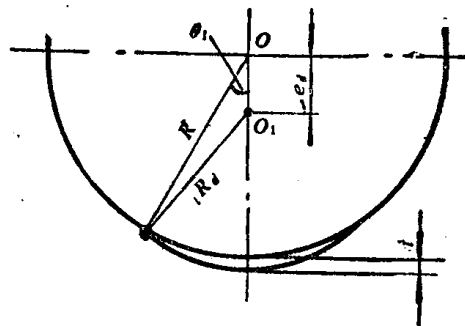


图2-3 弧形油腔各参数关系

$$e_d = R + t - R_d$$

根据余弦定理

$$R_d^2 = R^2 + e_d^2 - 2 R e_d \cos \theta_1$$

求解 R_d 得

$$R_d = \frac{R^2 + (R + t)^2 - 2 R (R + t) \cos \theta_1}{2 (R + t) - 2 R \cos \theta_1}$$

另外，还可以在普通车床上设计凸轮靠模进行加工。

⑤ 钳工划线、钻孔和修毛刺；

⑥ 插轴向回油长槽：要求位置对称；

⑦ 精磨内孔：以孔和端面找正，因孔内已有腔，磨时吃刀量宜小。留研磨余量0.03

mm；

⑧ 钳工细心修腔边和回油槽边毛刺；

⑨ 粗研内孔：留装配后再精研的余量0.01mm；

⑩ 精磨外圆和一个端面：磨削时使用锥度1:20000的心轴定位，保证内外圆同轴并与端面垂直。通常取作止推轴承端面的垂直度为3级精度。

(2) 主轴加工工艺

静压轴承主轴的加工与动压轴承主轴加工基本一样。静压轴承工作时轴与轴承之间不接触，因此，静压轴承主轴的淬火硬度可以比动压轴承主轴略低一些，粗糙度 R_a 值可以略高一些。

现以图2-4所示的主轴为例，其加工工艺如下。主轴材料为20Cr，渗碳淬火硬度为HRC 56~64。

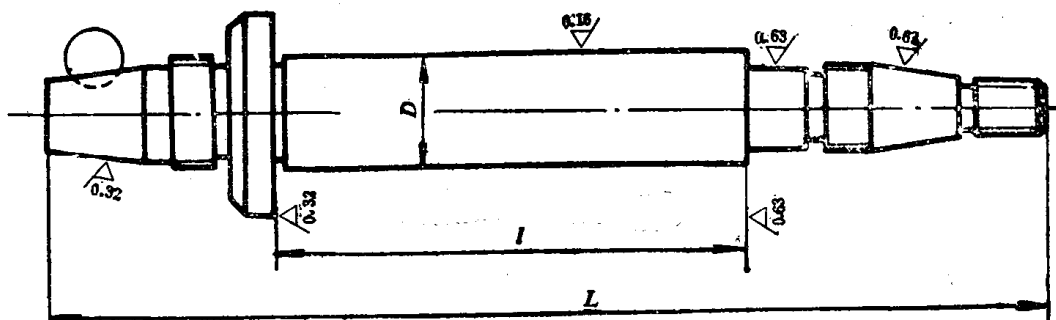


图2-4 静压轴承主轴

① 准备锻件毛坯（亦可用棒料）；

② 粗车：打中心孔，车全部外圆，留磨削余量 1.5mm，螺纹部分留去碳层2~3

mm；

③ 粗磨各外圆：留精磨余量0.6~0.8mm；

④ 钳工划线；

⑤ 铣键槽；

⑥ 热处理：表面渗碳；

⑦ 车去螺纹部分表面渗碳层；

⑧ 热处理：淬火、时效；

- ⑨ 研中心孔、半精磨各外圆和端面;
- ⑩ 定性处理;
- ⑪ 半精磨各外圆和端面;
- ⑫ 磨螺纹 (或精车螺纹);
- ⑬ 整体平衡 (有要求者);
- ⑭ 精磨成形: 先磨锥面和尾部, 最后精磨轴颈 ($R_a < 0.160 \mu\text{m}$)。

(3) 小孔节流器的加工

小孔节流器一般有两种形式, 一种为板式 (图2-5 a), 一种为锥塞头式 (图2-5 b)。板

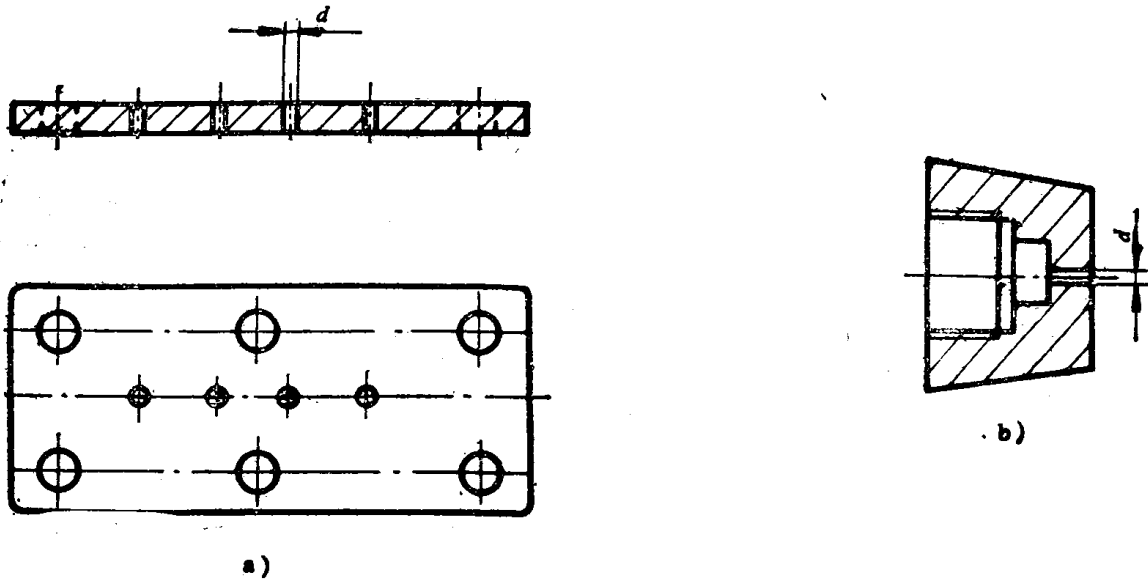


图2-5 小孔节流器

式小孔节流器采用45号或35号钢板, 精铣或刨四个侧面后, 精磨两大面到 $R_a < 0.63 \mu\text{m}$, 最后在高速台钻上钻各个孔。为保证在一块节流板上各节流孔孔径大小一致, 钻削速度和进给量应一样, 最好是由同一钻头一次装夹下钻出。

锥塞头式小孔节流器一般采用黄铜制造, 在小型精密车床上加工完毕后, 再用高速台钻钻节流小孔。要检查各节流器小孔流量是否一致, 可用图2-6所示简单测量方法。装配时, 选流量一致的一对节流器, 装于两相对的油腔上。

(4) 毛细管节流器的加工

毛细管节流器分直通式 (图2-7 a) 和螺旋槽式 (图2-7 b), 也可以用盘香槽式, 或者用细管制成螺旋管和盘香管。直通式一般采用医用注射针管, 用锡焊联接于锥形螺纹接头上。螺旋槽式的螺旋槽一般可采用车削或磨削的方法加工。

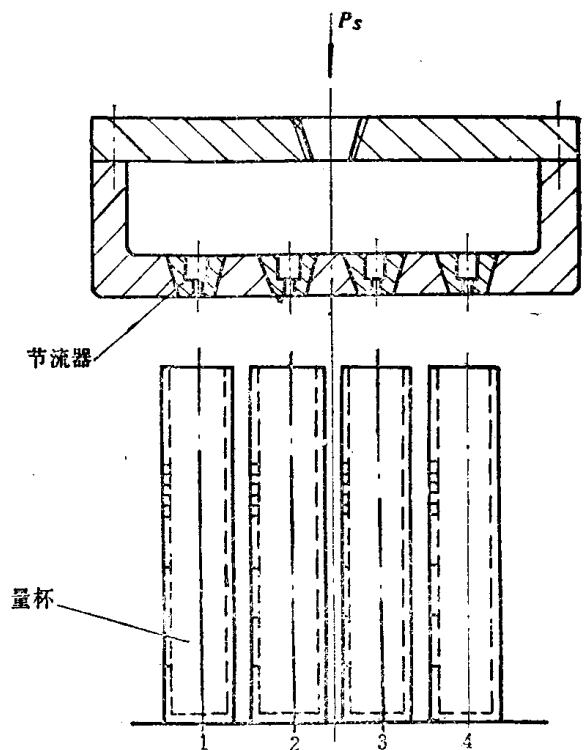


图2-6 小孔节流器流量测量

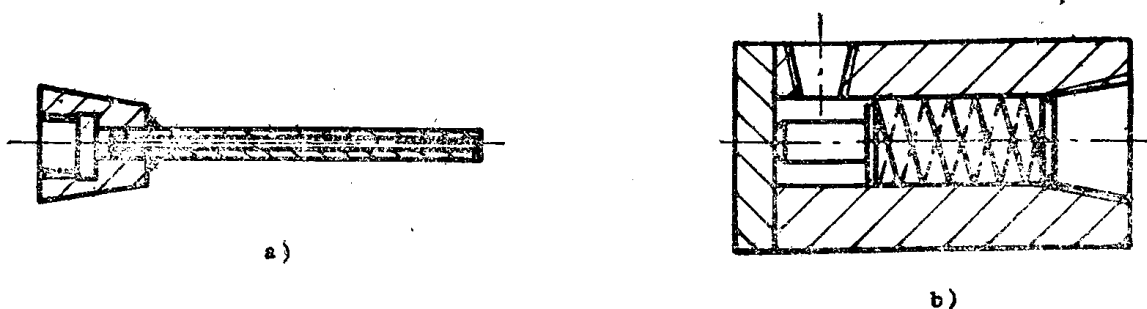


图2-7 毛细管节流器

(5) 薄膜反馈节流器上、下板加工工艺

薄膜反馈节流器上、下板示于图 2-8，材料采用45号钢。

- ① 精刨或铣六面；
- ② 粗磨六面；
- ③ 钳工倒角、修毛刺、一批中在一件上划线；
- ④ 精车节流环槽：在花盘上以 A、B 面定位，保证两环槽中心距一致；
- ⑤ 钳工钻油孔和倒角；
- ⑥ 热处理：淬硬至 HRC26~32，时效，氮化；

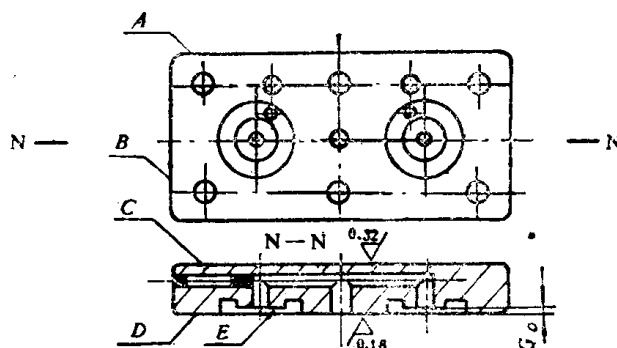


图2-8 薄膜反馈节流器上、下板

- ⑦ 粗磨六面；
- ⑧ 钳工划线、钻孔，清洗干净后堵孔；
- ⑨ 精磨上、下平面到 $R_a < 0.32 \mu\text{m}$ ，要有较高的平面度；
- ⑩ 精磨两节流凹台面 E，G。尺寸可为 0.05mm，对 C 面的平行度允差为 0.006mm。

磨凹台 E 面的方法有两种。一种方法是工件压在内圆磨床花盘上，用砂轮端面磨削。另一种方法是将工件装在能旋转的工作台面上，用砂轮外圆磨削。

⑪ 精研凹台 E 面，其对 C 面的平行度允差为 0.003 mm，可由钳工用小圆研棒端面研磨；

⑫ 精磨 D 面，保证 G 尺寸，允差 0.004mm。

(6) 薄膜反馈节流器膜片的加工工艺

薄膜反馈节流器膜片示于图 2-9，材料采用 65Mn 钢。

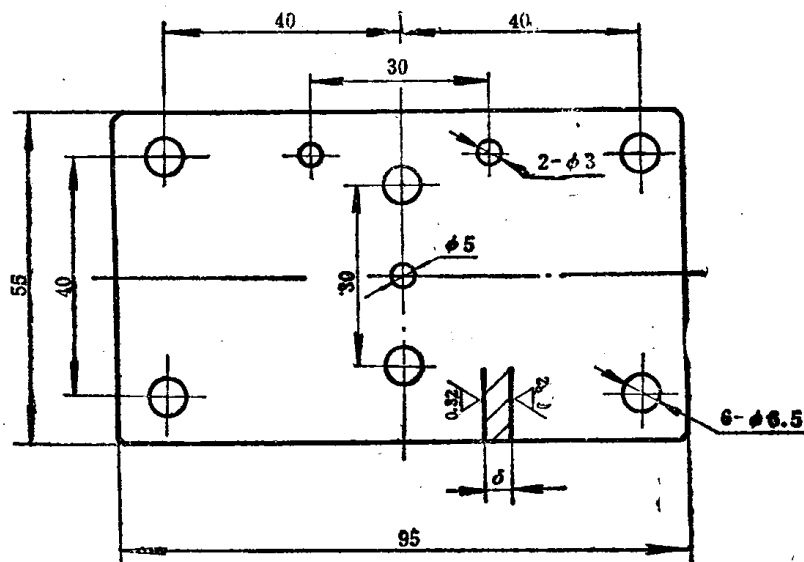


图2-9 薄膜反馈节流器膜片

- ① 粗磨上、下两平面，留余量 0.8mm ；
- ② 刨或铣四侧面；
- ③ 钳工划线、钻孔、修光；
- ④ 热处理：淬硬至 HRC41~46，时效（要求硬度均匀，变形小）；
- ⑤ 粗磨六面，上、下两大面留精磨余量 0.2mm ；
- ⑥ 再时效一次；
- ⑦ 精磨上、下两平面达 $R_a < 0.32\mu\text{m}$ ，平面度允差 0.015mm 。膜片上、下两面磨削是个关键工序，磨削时吸力要小，砂轮要窄、进给量要小、冷却液量要大、翻转要勤。

（7）滑阀反馈节流器的加工

滑阀反馈节流器的主要零件（见图2-10）是采用 HT 20-40 制的阀体和 45 号钢制的滑阀。阀体的加工方法是精车全部成形后，磨或精铰内孔，最后精研内孔，使阀体孔的圆度误差在 0.005mm 以内。滑阀的加工方法较简单，在小型精密车床上加工后，钻孔，经热处理后，精磨外圆成形。

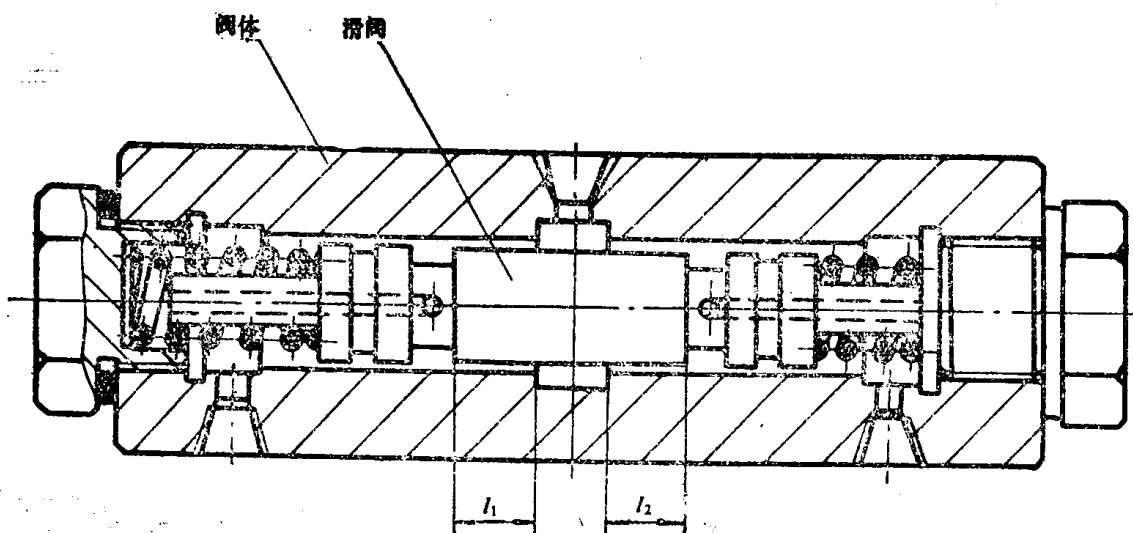


图2-10 滑阀反馈节流器

（8）内部节流器的加工

内部节流轴承的节流器位于轴承孔内部，看起来加工较复杂，但如采用铲齿车床加工并不困难。其加工方法与铲挖工作油腔一样，如图2-11所示。节流边长 L 的尺寸控制，可用块规和百分表调整位置后铲削。

2. 装配与调试

静压轴承主轴的装配和调试比动压轴承主轴的简单并且易于掌握。在设备的技术改造中采用静压轴承主轴，其装配工艺规程一般如下：修研或镗轴承箱体孔→按箱体孔配磨静压轴承外圆→将轴承装入箱体孔内→研磨两轴承孔、保证其同轴度→按轴承孔配磨主轴轴颈→调试。

（1）保证箱体孔的同轴度

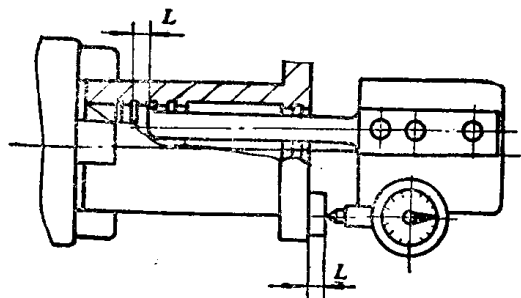


图2-11 内部节流器加工方法示意图

如果主轴的箱体是新换的, 则精镗箱体孔, 保证其两孔的同轴度要求。如果箱体为原来的旧箱体, 视其孔的同轴度、精度和表面粗糙度情况, 进行修研或精镗, 以保证其同轴度要求。

(2) 按箱体孔的尺寸配磨静压轴承外圆

磨前须将箱体孔的实际尺寸测量准确。可在轴承的外圆尾部磨出一段 $3 \sim 5 \text{ mm}$ 的“引导”部分, 以便装轴承时轴承位置容易摆正。轴承的装配过盈量须按轴颈大小和配合面粗糙情况而定, 一般取为 $0 \sim 0.025 \text{ mm}$, 亦有采用小于 0.005 mm 间隙配合的。磨轴承外圆和端面必须以锥度 $1:20000$ 心轴定位进行磨削, 这样才能保证两轴承装配后同轴度较好。

(3) 装配轴承

装配的方法一般有两种, 一是将轴承放置在冰箱里或干冰中, 冷冻 $1 \sim 2 \text{ h}$ 后其外径缩小 (通常要求缩小 $0.04 \sim 0.06 \text{ mm}$), 取出轴承放入箱体孔中。放入轴承时动作要迅速, 并注意油腔的方向。另一种方法是用压力或拉力将轴承装入箱体孔中。这时, 过盈量不宜过大。对小型轴承可在其端面垫以厚木块, 用榔头直接打入。对较大的轴承则利用专用工具 (如长丝杠、活动垫圈和螺母等) 逐渐拉入。为防止拉毛表面, 可在配合表面上涂一层干净的润滑油, 这样也能减小所需的压入力。

(4) 研磨

因为轴承装配后总会有一些变形 (如不圆和锥度) 和位置偏移, 所以要进行一次研磨, 保证其同轴度。研磨的方法如图 2-12 和 2-13 所示。研磨工具有两种形式, 一种是可调研棒, 其铸铁研套按 $1:50$ 锥度与长心轴配合牢固, 当尺寸研小后, 将研套推向心轴大头, 研套尺寸可以胀大 (见图 2-14)。另一种

是固定研棒, 它是带有螺旋槽的实心铸铁棒, 制造虽然简单, 但在尺寸研小之后必须换用新研棒, 通常研一对静压轴承需要 $2 \sim 3$ 根研棒。

研磨的操作方法有两种。小筒体的轴承孔在卧式研磨机或车床上进行 (如图 2-12), 研棒旋转而筒体只作缓慢的往复移动。主轴箱体大的

需紧固于大型方箱上, 把研磨棒悬吊起来, 并能作上、下移动, 用手转动研棒进行研磨 (见图 2-13)。粗研可用氧化铝研磨膏 M 14-10, 精研用氧化铝研磨膏 M 7-5; 也可用碳化硅研磨膏混以煤油, 粗研用 300 号油, 精研用 600 号或 800 号油。

开始粗研时, 研棒外径与轴承的间隙大小视箱体里两轴承孔的同轴度和研磨膏粗细而定。在研棒上均匀地涂上一层薄的研磨膏, 在保证研磨棒能穿过两轴承孔的条件下, 要使涂

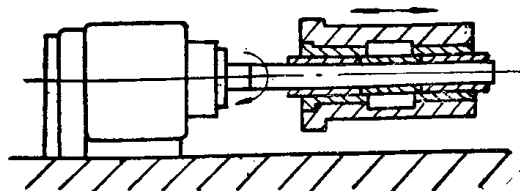


图 2-12 研磨小孔

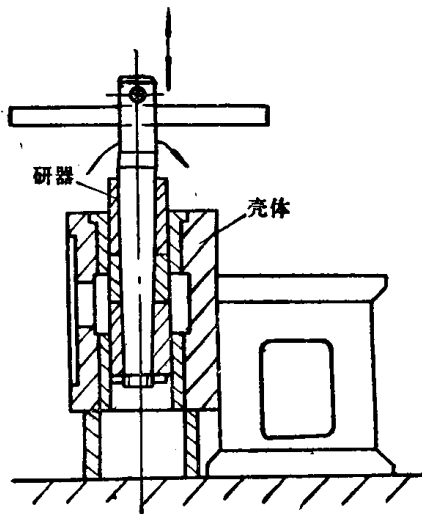


图 2-13 研磨大孔

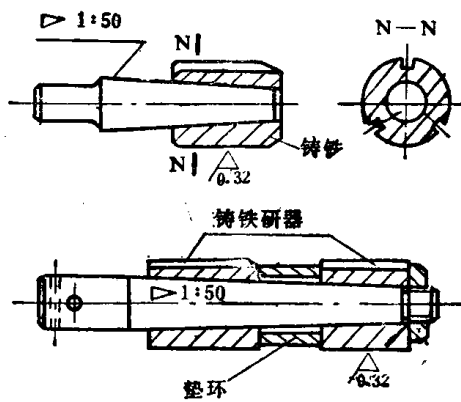


图 2-14 研磨器

有研磨膏的研棒在孔中转动困难,如研直径60mm的孔,应使一人旋转觉得吃力,两人操作合适。如间隙过大,研棒较松,研磨时不但无切削作用,还会研出喇叭口和几何形状误差,不能保证轴承孔的同轴度。因此,当研磨操作时觉得轻松,就不能继续研下去,必须胀大活研棒或更换新的固定研棒。尺寸较大的孔最好研棒垂直地进行研磨,水平研磨容易出喇叭口。在研好之后再进行精抛光。

止推轴承的工作表面,在要求严格时也需研磨。通常在径向轴承研好之后,对其垂直度进行检查。检查时用精研棒或长心轴为定位量棒,插入两轴承孔中,量棒一端用钢球定位,另一端固定着百分表,旋转量棒,检查轴承工作面的垂直度,作出“高点”的标记。研磨时使用较厚的研磨块,在“高点”处用较大的力进行手工研磨,以提高其垂直度。

(5) 配磨主轴外圆

磨前必须将研磨后的轴承孔测量准确,这是个关键。测量时可先用同样直径的精密环规校对百分表,再用百分表测量。或者用锥度极小(6:200000)的心轴插入要测量的轴承孔中,使其配合紧密,按靠近轴承端面处的心轴大端直径来配磨主轴外圆,达到要求的配合间隙。为避免测量有误差,磨削时主轴与轴承孔的间隙最好比要求的小0.005mm。调试时若发现间隙偏小,将主轴再研小一点也比较方便。精磨主轴外圆前,要检查主轴各段的外圆跳动情况(特别是装砂轮的前锥部分)。

(6) 静压轴承机床的调试

调试前要做好下列工作:对静压轴承的供油装置进行一次彻底的清洗,排除供油系统中滤油器内壁、蓄能器及阀内的脏物和铁屑,以防后患;油路系统中所有铜管孔壁要酸洗,清除管壁内黑皮;严格清洗节流器(尤其是薄膜反馈节流器)各孔道后,堵塞住进出孔口;清洗轴承各油孔;主轴和其它零件清洗前要去净毛刺,尤其是主轴的前引导部分要修整圆滑;最后在油箱中放入煤油,启动油泵电机,使煤油在油路中循环,以冲洗油箱、轴承和节流器,冲洗时间不得少于2h。

上述准备工作完成后,倒出煤油,给油箱注入静压轴承要求的润滑油,并换用新的精过滤芯。然后再清洗一次节流器。给轴承通入压力油后,观察各个节流器的油路是否畅通,其流量是否一致。如果各节流器的流量一致,主轴放入后则会浮起、转动轻巧。因此,放入主轴后应观察供油压力和油腔压力,是否达到要求的压力比范围。如果压力比不对,可以通过调整轴承间隙和节流器的节流尺寸来改变压力比。对于内部节流静压轴承,改变节流边长比较困难,可以使轴承工作油腔部分与敏感油腔部分的间隙不同,以调整压力比。

若两轴承同轴度不好,当压力油进入轴承后,主轴也浮不起来,转动沉重。这时要重新研磨轴承,提高其同轴度,就能使主轴浮起来。

径向轴承调整好之后,接着调整止推轴承。将止推轴承装配好之后,检查止推轴承的间隙和端面垂直度,不合格时采取相应的措施进行修整。轴承端盖须压平,盖孔与主轴封油轴颈之间的间隙要小而均匀,否则主轴旋转时将会漏油。

装配完毕可对主轴作静态回转精度检查。一般来说,如果两轴承同轴度和主轴几何形状精度较高,其轴向和径向跳动是极微的。

若主轴高速旋转时油腔压力变化,压力表指针跳动厉害,则可能是卸荷装置与主轴不同轴、主轴不平衡,或者可变节流器装配不牢固、接触面不贴合等原因,致使主轴运转不稳,作相应调整后即可消除。

三、实例应用

国内用静压支承来改造旧机床到现在已有二十多年的历史,各工厂企业成功经验很多,下面介绍的一些实例是1984年前设备改造中的成功设计中的一部分,有些使用时间长些,有些短些。还有一些优秀的设计来不及收集。

关于节流器的选取,由于历史的或认识上的原因,起初只限于使用一、二种,譬如最初小孔节流器用得较多。以后采用的节流器种类多了起来。每种节流器有它的长处,也有它的短处,在合适的应用场合,能发挥其长处,抑制其短处,反之,就是选用不当。但是,选用不当并不等于该节流器不能工作。选用节流器时要考虑的因素很多,如加工、载荷、刚度要求、温度范围等。在本书推荐的应用实例中,有些实例选用的节流器并不一定是最恰当的节流器型式。

对于机床主轴来说,至关重要的主轴系统的刚度。它主要包括主轴抗弯刚度和支承刚度。在不同的情况下,支承刚度对系统刚度的影响是不同的。对于一般的中小型机床,由于静压支承的油膜刚度较高,提高轴系刚度的重点应该是提高轴的抗弯刚度。不加分析,盲目提高支承刚度并不恰当。

静压轴承没有角刚度,类似于单列向心球轴承。采用静压轴承的机床主轴,至少需要两个轴承(双支点),也有用三个轴承(三支点),甚至四个轴承(四支点)的。一般来说,主轴弯曲刚度较弱时,采用多支点轴系结构能提高主轴的弯曲刚度。但是,多支点轴系结构给制造带来了麻烦,另外摩擦功耗增大、发热增加、流体流量也加大。因此,从结构上增大主轴直径往往比采用多支点轴系结构来提高主轴的抗弯刚度更有利。

在静压支承的计算上,最初着重按设计状态下可取得最大刚度来选取参数,以后逐渐考虑按工况变化范围内有最好性能来选取参数,也有根据优化设计方法选用最优参数。在本书推荐的实例中,基本上没有作优化计算,所以选用的参数可能不是最佳的,但是实践证明,它们是可行的。

因而,总起来说,本书选用的应用实例只能说是成功的设计,还不能说是最佳的设计,无论在节流器型式的选取、支承结构以及主要参数方面,都有进一步完善的可能。对于初次接触静压支承的同志,可以直接采用本书推荐的结构和参数,通常能取得较好的效果。对于比较有经验的同志,本书的实例可供参考,并可以在此基础上进一步改进,设计出更佳的结构。

1. 外圆磨床的改装

外圆磨床类机床是以砂轮和被磨工件外圆接触进行切削为特点的。和内圆磨削相比,砂轮直径不受工件尺寸的限制。通常,砂轮直径比工件直径大几倍,因此在砂轮允许的线速度范围,砂轮主轴的转速不很高(约在1000 r/min左右),主轴轴颈的线速度在10 m/s以下。为保证工件的表面粗糙度和精度要求,砂轮主轴应具有高的回转精度、大的径向刚度。过去多采用动压滑动轴承,但由于轴颈的线速度低,动压滑动轴承的刚度受到一定的限制,制造难度大,即使机床制造厂采用先进结构和工艺生产出高回转精度和大刚度的轴承,由

于启动和停车时不可避免地存在接触磨损,其寿命总是有限的,特别是精度保持寿命更低。

静压轴承具有回转精度高、精度保持性长、适应范围广等优点。我国从六十年代起,特别是在改造旧外圆磨床时广泛使用了静压轴承,在生产上发挥了积极作用,取得了显著的经济效益。

以下介绍外圆磨床、无心磨床和曲轴磨床等 13 台外圆磨床类机床砂轮主轴采用各种节流形式静压轴承的应用实例。

(1) M115A 外圆磨床

该机床是我国五十年代的产品,出厂精度为圆度误差小于 0.003mm 、表面粗糙度 $R_a \leq 0.32\mu\text{m}$ 。长期使用后精度下降,多次出现“抱轴”现象,要花费大量的人力和资金进行修理。同时,随着产品质量要求的提高,该机床的原始精度也满足不了产品的要求。为此,上海滚动轴承厂应用静压轴承对其砂轮主轴进行了改装。

结构特点 (参见图 3-1)

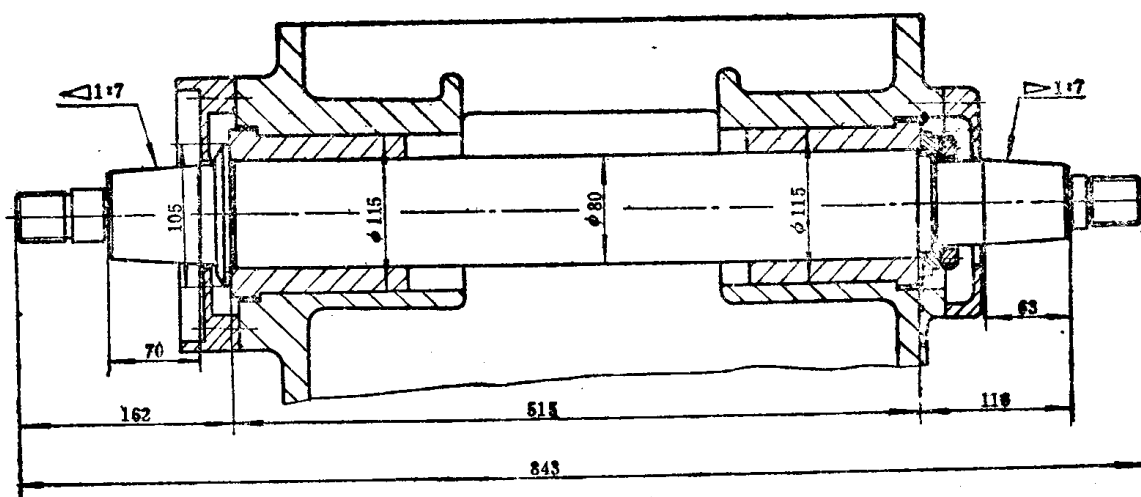


图3-1 M115A 外圆磨床砂轮架示意图

① 根据机床的原始条件,采用两个径向止推联合轴承,以径向轴承的腔压为止推轴承的进油压力,径向轴承轴向封油面则为节流器,端面为止推面,这种轴承的优点是结构简单,

② 轴承采用内部节流,它的节流器直接加工在轴承内表面上,利用轴颈与轴承之间的间隙形成进油液阻,从图 3-2 可以看出,该轴承采用了敏感油腔完全被进油油腔所包围的结构,具有性能可靠、不易堵塞等优点;

③ 前后轴承采用完全相同的构造,简化了设计和制造。

主要参数 (参见图 3-2)

径向轴承半径间隙 $h_r = 0.02 \sim 0.025\text{mm}$, 供油压力 $p_s = 2\text{MPa}$, 润滑油为粘度 $5 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 的混合高速机械油。

使用效果

改装后用于精磨 $\phi 250\text{mm}$ 外圆,表面粗糙度 $R_a \leq 0.32\mu\text{m}$ 。

(该机床在上海滚动轴承厂使用,资料由苏安翔提供)

(2) M120W 外圆磨床

M120W 万能外圆磨床是我国六十年代初期的产品,其砂轮主轴轴承是动压滑动轴承,