

精密机床轴承应用技术

洛阳轴研科技股份有限公司 姜韶峰

主轴作为机床的重要零部件，被视为“心脏”，其性能直接影响机床的精度、刚性、寿命和可靠性。而轴承作为关键的机械基础件，其技术水平的高低和产品质量的好坏对主轴系统乃至主机的性能有着举足轻重的影响，又被誉为机械装备的关节。

通常对主轴的最基本要求：高旋转精度；高速；宽的变速范围；高刚性；低而稳定的温升；高可靠性。

以上的要求，有些之间是相互冲突的，要一根主轴同时满足上述所有的要求几乎是不可能的。因此，在设计主轴支承结构时，要考虑机床的主要性能，根据机床不同的性能选用不同类型的轴承及组配形式作为主轴的支承结构。

针对机床的不同需求，有多种类型机床轴承和配置方式可供选择。

1. 精密机床轴承的类型和特点

1. 1 主轴轴承

1. 1. 1 角接触球轴承

1. 1. 1. 1 尺寸系列

机床用角接触球轴承按尺寸系列一般分 18、19、(1)0、(0)2 四个系列。对相同内径的轴承，18、19、(1)0、(0)2 四个尺寸系列轴承的外径依次增大。精密机床主轴主要根据刚度和转速来选择支承轴承，然后再根据需要考虑其他因素，如承载能力、抗振性、噪声等，相同的安装空间，(1)0、19、18 尺寸系列的轴承允许的轴径依次增大。另外，轻系列的轴承虽然球径较小，但安装的球数多，同样保证轴承具有较高的刚度。较小球径的轴承由于产生的离心力小，因而允许的转速也高。所以，从刚度和转速两方面来考虑，精密机床主轴轴承宜选用(1)0、19、18 尺寸系列，但由于 18 系列轴承壁薄、加工难度大，除非特殊场合，一般很少采用。故高速精密机床主轴最常见的角接触球轴承为(1)0、19 尺寸系列。

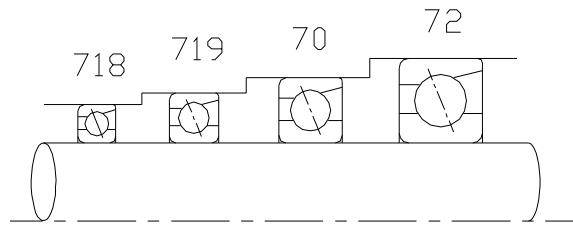


图 1 相同内径不同尺寸系列轴承对比示意图

1. 1. 1. 2 接触角

机床用角接触球轴承按接触角一般分 15° 和 25° 两种。

对角接触球轴承而言，接触角越大，轴向承载能力越大，但轴承的极限转速越低。因此， 15° 接触角宜用于转速较高、轴向载荷较小处。

1. 1. 1. 3 结构类型

轴承按结构类型分开式和密封两种。

密封轴承用于脂润滑，油润滑适用于开式轴承。

1. 1. 1. 4 滚动体材料

机床用角接触球轴承按滚动体材料分钢球和陶瓷球两种。

高速精密机床主轴陶瓷球轴承目前主要是指仅滚动体采用氮化硅陶瓷材料、内外套圈仍采用优质轴承钢的混合陶瓷球轴承。陶瓷球轴承较同类型、同规格的钢制球轴承极限转速提高 $25\% \sim 30\%$ ，相同工况条件下，寿命提高约 3 倍。

表 1 氮化硅与轴承钢的主要性能对比

性能	代号及单位	氮化硅	轴承钢
密度	γ [g/mm ³]	3.2	7.8
热膨胀系数	α [1/°C]	20~1000°C	3.2×10^{-6}
		20~300°C	-
弹性模量	E [N/mm ²]	3.15×10^5	2.08×10^5
泊松比	μ	0.26	0.3
硬度	HV10	1700	700
应力强度	σ_b [N/mm ²]	20°C	700
		1000°C	700
断裂韧性	K_{Ic} [MN/m ^{1.5}]	7	25
导热系数	λ [W/m°C]	30~40	40~50
电阻率	[Ω mm ² /m]	$10^{17} \sim 10^{18}$	0.1~1

1. 1. 1. 5 润滑方式

机床用角接触球轴承按润滑方式分脂润滑和油润滑两种。

轴承润滑方式的选择与轴承的转速、载荷、容许温升、轴承类型以及相关条件等有关。

脂润滑的特点是润滑剂粘附力强、使用方便、维护简单，无需经常添加和更换润滑剂。但其摩擦阻力要比油润滑时大。

滚动轴承最常用的润滑脂是以矿物油作为基础油的锂基脂，对高速精密轴承也可采用以合成双脂润滑油为基础油的复合钼基脂。

滚动轴承中不宜过多地充填润滑脂，否则，脂因搅拌发热发生熔化、变质而丧失润滑作用。轴承的填脂量应根据轴承的类型、尺寸和工作转速等确定。对高速精密机床轴承则根据轴承的转速情况推荐为以填满轴承内部自由空间的15%~25%为宜。

脂润滑轴承在工作初期必须先进行跑合，经过跑合，过量的润滑脂强制进入轴承滚道，使轴承内的润滑脂均匀分布，并可保证在轴承正常工作时热平衡温度最低。跑合从低速（如最高转速的一半）开始，当达到稳定温度时再提高转速，直至达到轴承的最高转速并且温度稳定为止。

高速精密机床用滚动轴承的油润滑常采用油雾润滑、油气润滑、喷射润滑以及环下润滑（或直润滑）等。

油雾润滑具有润滑和冷却双重作用，它以压缩空气为动力，通过油雾器将油液雾化并混入气流中，然后把其输送到需要润滑的位置。油雾润滑所需设备简单，维修方便，价格比较便宜，是一种普遍使用的高速电主轴润滑方式。但它有污染环境，油耗比较高等缺点。随着人们对环保要求的提高，油雾润滑方式必将逐渐被淘汰。

油气润滑技术是利用压缩空气将微量的润滑油分别连续不断地、精确地供给轴承，微小油滴在滚动体和内外滚道间形成弹性动压油膜，而压缩空气则带走轴承运转所产生的部分热量。油气润滑是高速大功率电主轴轴承的最理想润滑方法，但其所需设备复杂，成本高。由于油气润滑方式润滑效果理想，目前已成为国际上最流行的润滑方式。

喷射润滑法是将润滑油从接近轴承的喷嘴小孔中，以 $10\sim 20\text{m/s}$ 的速度喷入轴承，通常是喷入保持架与内圈或外圈所形成的间隙中，具有润滑并冷却轴承的作用。双孔或多孔喷嘴既可加大供油量，也可提高润滑油的使用效率，而多喷

嘴或在两个端面都设喷嘴，可以提高润滑与冷却的效果，但当 $d_m n$ 值接近 200 万时，由于离心惯性和风阻的影响，送入轴承的油只有喷嘴流量的 70% 或更少。

环下润滑法是利用离心惯性，直接将油经由开设在内圈上的许多径向小孔而喷向滚道表面，油的一部分沿内圈下方作轴向流动而达到冷却内圈的目的。进入滚道的油分成左右两条通道向外流出，顺便将从保持架等零件落下的磨屑冲掉。

环下润滑的用量比喷油润滑少得多，由于油的动力搅拌所导致的功率损失也少，轴承的发热情况也得到较大改善，甚至内圈温度可能低于外圈从而降低轴承故障率。环下润滑法被广泛用于各种超高速运转场合。

ZYS 还开发一种外圈滚道直润滑的超高速机床主轴轴承，即在主轴轴承外圈沿径向开设润滑油孔，使润滑油经过该径向孔直接对轴承滚道进行润滑，也可大大提高轴承的极限转速。

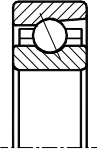
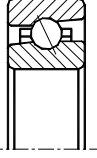


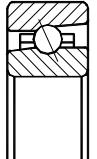
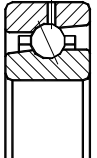
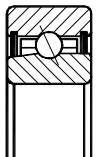
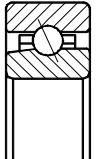
图 2 ZYS 开发的外圈滚道直润滑的超高速机床主轴轴承

1. 1. 1. 6 ZYS 高速精密角接触球轴承产品系列、类型和性能特点

ZYS 高速精密角接触球轴承产品有多种类型系列可供选择。

表 2 ZYS 高速精密角接触球轴承产品系列、类型和性能特点

ZYS 角接触球轴承系列	结构形式	尺寸系列	内径尺寸范围 (mm)	性能特点
高精密角接触球轴承		718 C、718 AC、 719 C、719 AC 70 C、70 AC、 72 C、72 AC	718: 10~360 719: 8~460 70: 8~380 72: 8~220	. 高速 . 高承载能力 . 适于脂润滑或油雾润滑
高速角接触球轴承 (含陶瓷球轴承)		H719 C、H719 AC、 H70 C、H70 AC、 H719 C/HQ1、 H719 AC/HQ、 H70 C/HQ1、 H70 AC/HQ1	H719: 8~220 H70: 8~220 H719/HQ1: 8~220 H70/HQ1: 8~220	. 超高速 . 高刚度 . 适于油气润滑或喷射润滑

超高速角接触球轴承 (含陶瓷球轴承)		HS719 C、HS719 AC、 HS70 C、HS70 AC、 HS719 C/HQ1、 HS719 AC/HQ、 HS70 C/HQ1、 HS70 AC/HQ1	HS719: 8~220 HS70: 8~220 HS719/HQ1: 8~220 HS70/HQ1: 8~220	.超高速(比H系列更高) .高刚度 .适于油气润滑或喷射润滑
直润滑超高速角接触球轴承(含陶瓷球轴承)		H719 C-DL、H719 AC-DL、 H70 C-DL、H70 AC-DL、 H719 C-DL/HQ1、 H719 AC-DL/HQ、 H70 C-DL/HQ1、 H70 AC-DL/HQ1、	H719-DL: 20~120 H70-DL: 30~120 H719-DL/HQ1: 20~120 H70-DL/HQ1: 30~120	.超高速(比H及HS系列更高) .高刚度 .适于直润滑
高速密封角接触球轴承(含陶瓷球轴承)		B719 C-2RZ、B719 AC-2RZ、 B70 C-2RZ、B70 AC-2RZ、 B719 C-2RZ/HQ1、 B719 AC-2RZ/HQ1、 B70 C-2RZ/HQ1、 B70 AC-2RZ/HQ1	B719-2RZ: 10~220 B70-2RZ: 10~220 B719-2RZ /HQ1: 10~220 B70-2RZ /HQ1: 10~220	.高速 .高刚度 .脂润滑
高速内圆磨削主轴轴承(含陶瓷球轴承)		B70 C、B70 C/HQ1	B70 C: 10~60 B70 C /HQ1: 10~60	.超高速 .高刚度 .适于油雾润滑

1. 1. 2 圆柱滚子轴承

圆柱滚子轴承中滚子和滚道为线接触，该轴承能承受较大的径向载荷。由于圆柱滚子轴承内外圈可分离，故不能承受轴向载荷。圆柱滚子轴承有单列和双列之分，内孔分圆柱孔和带 1:12 锥度的圆锥孔。其中，精密机床主轴轴承最常见的圆柱滚子轴承为内孔带 1:12 锥度的双列圆柱滚子轴承 NN30K 系列，该轴承需要与承受轴向载荷的双向推力角接触球轴承 2344 系列组合使用，其最显著的优点之一就是，即使安装后也可调整内部游隙。

圆锥孔双列圆柱滚子轴承其内圈圆锥孔的锥度为 1:12 (即半锥角 $2^{\circ} 23' 9.4''$)，与主轴的锥形轴颈相配合。轴承装配过程中，轴向移动内圈，可以把内圈胀大，从而改变轴承内部径向游隙并实现轴承的预紧。

N10 和 NN30K 系列圆柱滚子轴承，挡边设在内圈，外圈可分离。对于双列圆柱滚子轴承，当使用油润滑时，在轴承外圈中间设置了一个环型油槽和对称分布的三个润滑油孔，标记为 W33。

圆柱滚子轴承常用于载荷较大,要求刚度较高,而转速相对来说不太高的中、大型机床。

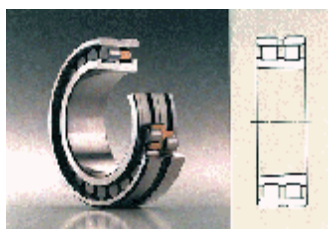


图 3 双列圆柱滚子轴承图示

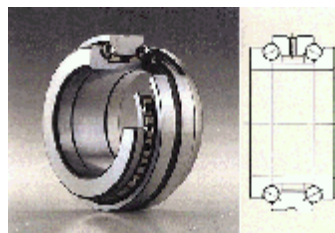


图 4 双向推力角接触球轴承图示

1. 1. 3 双向推力角接触球轴承

双向推力角接触球轴承由两个轴圈、一个座圈、一个隔套、两套滚动体与保持架组件组成。修磨隔套的厚度即可调整轴承的预紧。轴承公称接触角为 60° ,可承受较大双向轴向载荷、轴向刚度。该轴承的公称外径和与其配套的双列圆柱滚子轴承的外径相同,但其偏差较小,故与箱体孔的配合有一定间隙。因此。双向推力角接触球轴承不能承受径向载荷,与其配套的双列圆柱滚子轴承用来承受径向载荷。

精密机床主轴用双向推力角接触球轴承常用的是 2344 和 2347 两个系列。2344 系列轴承用于与双列圆柱滚子轴承锥孔小端配合, 2347 系列用于大端。

随着数控机床高速化的发展,双向推力角接触球轴承其转速性能有时可能不能满足数控机床高速化的需求,这时可用两套背靠背接触角为 30° 或 40° 的角接触球轴承组替代。

该轴承外圈外径的尺寸公差同相应的双向推力角接触球轴承,装配时,外圈外径与轴承座内孔之间有一定间隙,因此,高速推力角接触球轴承不承受径向载荷。

ZYS 高速推力角接触球轴承代号为 70X2 A/DB (接触角 30°) 和 70X2 B/DB (接触角 40°)。

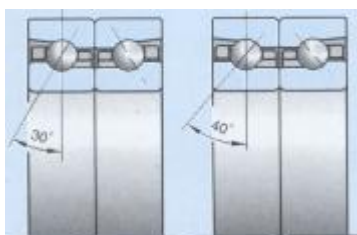


图 5 高速推力角接触球轴承图示

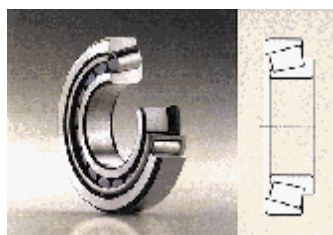


图 6 圆锥滚子轴承图示

1. 1. 4 圆锥滚子轴承

圆锥滚子轴承可承受径向载荷和一个方向的轴向载荷，同角接触球轴承一样，在径向载荷作用下，圆锥滚子轴承内部产生一轴向分力，因此，常与承受反向轴向载荷的另一圆锥滚子轴承配合使用。圆锥滚子轴承可承受较大的轴向载荷，轴向刚度较高，但其转速性能较低。

1. 2 滚珠丝杠轴承

滚珠丝杠轴承即指 60° 接触角的单向推力角接触球轴承，该轴承能承受较大的单一方向的轴向载荷，同时也可承受一定的径向载荷，滚珠丝杠轴承常常需组配使用，该轴承结构特点为高的轴向刚度、高转速、低摩擦、长寿命以及瞬时高低速转换性能好等。

ZYS 滚珠丝杠用轴承有公制尺寸系列 7602 和 7603，也有非标尺寸 BS 系列以及英制等特殊系列。

另外，ZYS 还开发了两端带密封圈的滚珠丝杠用轴承。

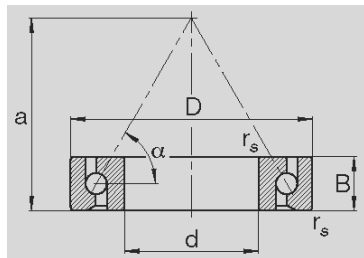


图 7 滚珠丝杠轴承图示



图 8 ZYS 转台轴承

1. 3 转台轴承

ZYS 转台轴承是一种轴向和径向圆柱滚子组合轴承，由两个推力滚针轴承和一个向心圆柱滚子轴承组合而成，轴向和径向设置预载荷，该轴承具有高精度、高刚性、高承载能力。为了运输和安装方便，内圈和外圈上均开设多个螺钉孔，整套轴承使用定位螺钉紧固。该轴承特别适用于机床或其他精密机械的旋转工作台或分度盘。安装时需控制安装螺钉的扭紧力矩。

2. 主轴轴承的组配

为了提高轴承的承载能力和刚度，角接触球轴承通常采用两个或多个轴承组配使用。

ZYS 用于组配轴承的单个轴承除了满足相关的外形尺寸公差和旋转精度要求之外，组配轴承中任意两个轴承间在下述几项性能参数都有严格的控制要求：

- (1) 任意两个轴承平均内径相互差。(2) 任意两个轴承内圈径向跳动相互差。(3) 任意两个轴承平均外径相互差。(4) 任意两个轴承外圈径向跳动相互差。
- (5) 任意两个轴承实际接触角相互差。(6) 相邻两个轴承凸出量相互差。

轴承双联配置的形式有背靠背 (DB 型)、面对面 (DF 型) 以及串联 (DT 型) 三种。

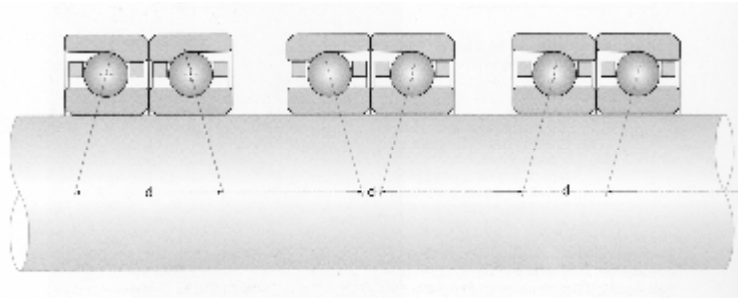


图 9 轴承双联配置形式

表 3 双联轴承配置的特点

配置形式	代号	特 点
背靠背	DB	1. 对称安装; 2. 能承受径向载荷; 3. 能承受两个方向的轴向载荷; 4. 能承受较大的倾覆力矩。
面对面	DF	1. 对称安装; 2. 能承受径向载荷; 3. 能承受两个方向的轴向载荷; 4. 承受倾覆力矩的能力较差。
串联	DT	1. 两套轴承相同; 2. 同向排列; 3. 能承受径向载荷; 4. 能承受一个方向较大的轴向载荷。

为了获得更高的承载能力和刚度, 机床主轴用角接触球轴承还采用三联、四联甚至五联等多联配置方式。其中, 常用的三联和四联配置形式见下图。

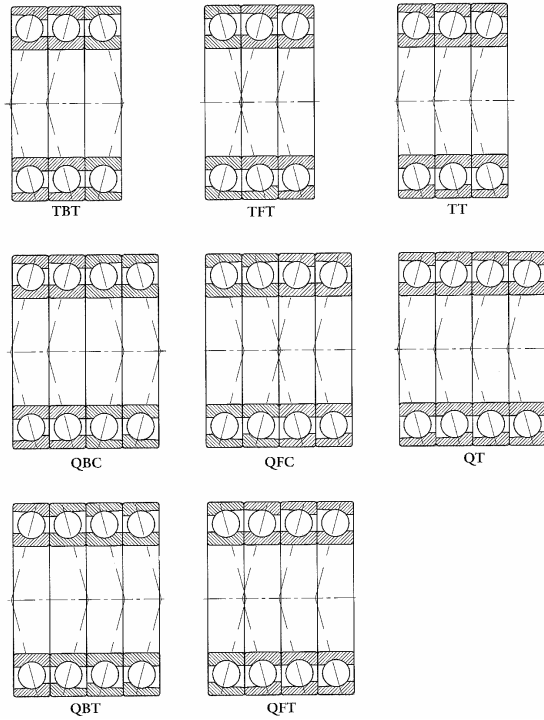


图 10 轴承多联配置形式

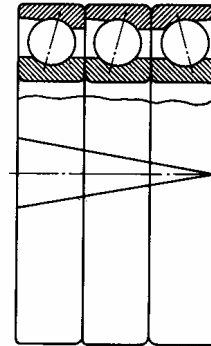


图 11 组配轴承外圈角线标示

示

对组配轴承，受载方向不同，轴承组的工作性能也不同。因此，组配轴承，尤其是不对称排列的组配轴承都有一固定的安装方向。为此，ZYS 在其组配轴承的外圈上沿轴线方向标记有角线“∨”，角线“∨”开口对着作用在内圈上轴向载荷，即角线“∨尖角方向应与作用在轴承内圈上轴向载荷的方向一致。如果作用在轴承内圈上的载荷为双向，则角线“∨尖角方向应与作用在轴承内圈上较大轴向载荷的方向一致。

除上述固定组配形式外，角接触球轴承还有一种万能组配形式，即两个万能组配单套轴承可以组成背靠背（DB 型）、面对面（DF 型）或串联（DT 型）任一形式。但万能组配的单套轴承除满足一般的组配轴承的技术要求外，还必须保证单套轴承内外套圈两端的凸出量相同。因此，其技术含量高，加工难度大。

3. 精密机床轴承的预紧

精密滚动轴承在工作时一般要施加一定的预载荷，其主要目的：（1）使旋转轴在轴向和径向正确定位，提高轴承的旋转精度；（2）提高刚度；（3）控制高速下滚动体的自旋滑动，减少滚动体的公转打滑；（4）减少支承的轴向和径向的窜动量；（5）提高轴承阻尼，降低振动和噪声；（6）提高轴承使用寿命；

滚动轴承的预紧分轴向预紧和径向预紧。角接触球轴承、滚珠丝杆轴承以及双向推力角接触球轴承采用轴向预紧的预紧方式，而圆柱滚子轴承则采用径向预紧的方式。

角接触球轴承采用轴向预紧时，按照施加预紧载荷的方式又可分为定位和定压两种预紧方式。

定位预紧的轴承在使用过程中支承间的相对位置固定不变。角接触球轴承高速旋转时，由于离心力的作用，滚动体有“外抛”的趋势，从而使得轴承内外套圈间有轴向相对移动的倾向。但由于其位置已相对固定，因此离心力的作用导致轴承预紧力加大，摩擦发热加剧，另外，工作温度的变化会引起轴及轴承座尺寸以及两支承间定位部件尺寸的变化，这也会影响到轴承的预紧状态。所以，采用定位预紧方式时应注意预载荷的变化对轴承工作性能的影响，定位预紧常用于刚性要求较高的场合，例如用于车床和加工中心等切削型主轴上。

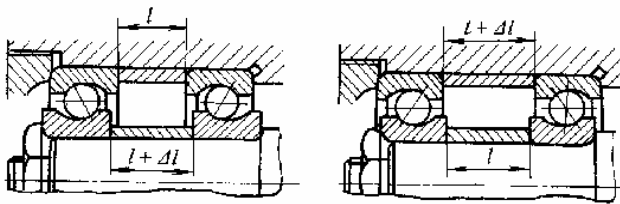


图 12 轴承的定位预紧

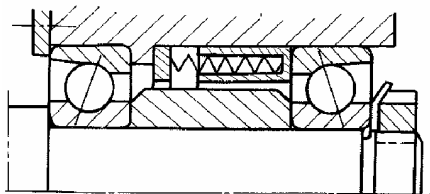


图 13 轴承的定压预紧

定压预紧是利用螺旋弹簧、蝶形弹簧等预紧装置，使轴承在支承部位得到合适的预紧。由于弹簧预紧的刚性比轴承的刚性小的多，因此，经定压预紧后的轴承，其相对位置在使用过程中会有所变化，但这微小的变化会被弹簧的伸缩变形吸收，从而避免了轴承预载荷的增加，所以说定压预紧有利于轴承的高速旋转，但外部载荷引起的弹簧变形却对轴承刚性大大不利。也就是说，定压预紧适用于各种载荷较小、高速旋转的磨削主轴和高速、轻切削专用机床主轴。

适当的预载可以提高轴承的旋转精度和刚性，但预载荷过大，不仅使轴承的发热加剧，增加了烧伤的可能性，而且也会降低轴承的使用寿命。因此，应合理选择预载荷。

轴承的最佳预载荷应根据其工作转速、外加载荷、润滑方式，并结合以往经验，通过反复试验确定。

ZYS 机床主轴用高速精密角接触球轴承在组配时有轻、中、重三种预载等级，分别用 A、B、C 表示。ZYS 还可根据用户的需求制做有特殊要求的预载荷。

机床主轴轴承的温升是有一定限制的，因此，预紧力的选择应遵循以下原则：机床载荷大、刚度要求高、转速较低或允许的温升较高时（如普通精度级机床），应选择大的预紧力；反之，则选择小的预紧力。一般地说，重预紧用于低速、要求高刚度的场合，如齿轮和螺纹加工机床的分度轴；中预紧用于中等转速、中等载荷的外圆磨床、螺纹磨床、齿轮磨床、精密车床、加工中心等主轴；轻预紧则用于高速、轻载荷或允许温升较低的精密、高精度机床主轴，如内圆磨床、坐标镗床、精密及高精度加工中心等。

以上对预紧力的分析都是宏观的、定性的，若要确定轴承的最佳预紧力，必须考虑实际工况条件，如转速、外载荷、允许温升等。

4. 机床主轴支承系统的结构分析

滚动轴承可通过各种不同的组配方式，以适应于各种不同的机床应用场合。对速度范围变化较窄的磨床，可以针对其特定的速度、温度、刚度和寿命要求得到最优的主轴设计，选择最合适轴承结构和最佳截面参数。而对于数控车床、铣床和加工中心等加工范围很大、适用面很广的机床，其主轴受载和刚性将随速度、加工精度要求而有所不同。有些要求甚至是相互矛盾的。所以轴承的选择就只能根据加工精度、刚度、载荷和寿命等要求综合平衡后而确定。

表 4 常见主轴用轴承几种配置方式及性能比较

序号	前支承	后支承	高速性	旋转精度	刚性	寿命	备注
1			差	一般	很好	很长	轴向和径向载荷分别由不同轴承承受，轴向和径向刚度很高，温升对刚性、精度和寿命影响小，适用于普通车床、铣床、镗床等。

2			一般	较高	较好	长	径向轴向载荷均由四联组配角接触球轴承承受，径向和角刚度都极高，适用于平面磨床、外圆磨床等。
3			较好	高	较好	长	此配置比 2 更适于高速性，旋转精度更高，除适用于平面、外圆磨床外，还用于滚动丝杠（接触角为 60°）。
4			一般	较高	较好	较长	径向轴向载荷由三联组配角接触球轴承承受，轴向尺寸比 1、2、3 紧凑，适用于中速数控车床、数控铣床等。
5			好	高	较好	较长	后支承用两联配对角接触球轴承，取代 4 中的圆柱滚子轴承，使主轴具有较好的高速性和更高的精度，适用于加工中心，数控车床、数控铣车、数控镗床和内圆磨床等。
6			很好	高	一般	一般	适用于高速、轻切削应用领域，是内圆磨床、高速加工中心，数控车床和数控铣床的典型配置，相比之下，6 配置比 7 配置更适于高速，而 7 配置比 6 配置调整方便些。
7			很好	高	一般	一般	
8			很好	高	一般	一般	适用于超高速轻切削应用领域，常用于内圈磨削和超高速数控钻铣床等。
9			很好	很高	差	差	
10			很差	较高	很好	很长	主轴部件结构简单，径向轴向刚性非常好，普通精度的轴承配置不适用于高速，但如配用超精密轴承，可控预紧，通常用以解决强力、高速、高精度切削场合。

上表列出了机床轴承常见的配置形式和性能特点。一般而言，深沟球轴承、圆柱滚子轴承可用来承受主轴的径向载荷，推力球或推力滚子轴承可用以承受轴向载荷。角接触球轴承和圆锥滚子轴承用来承受径向轴向联合载荷以及载荷方向不够明确的附加载荷。对于高刚性、大载荷、中低速、可首选配置 1，中速、高

刚性兼高精度选择配置 2 和 3，如要实现高速和轻载，则要选用配置 5、6 和 7。如果应用场合为超高速切削，则只有选择配置 8 和 9。对高速重载、高刚性的主轴，可选用配置 10。

5. 机床主轴支承系统的典型结构

图 14 是机床主轴支承系统最常见的配置形式，在普通车床、铣床、镗床等机床中较为常见。标准配置形式是前支承采用带锥孔的双列圆柱滚子轴承和双向推力角接触球轴承，后支承也采用带锥孔的双列圆柱滚子轴承，这种配置具有主轴刚性好，径向结构紧凑，圆柱轴承和双向推力球轴承分别承受径向和轴向载荷，主轴的轴向热变形可由圆柱滚子轴承内外圈轴向错位而消除。安装时，通常通过锥面配合而进行径向预紧或将轴承初始工作游隙调整为零。



图 14 普通车床主轴

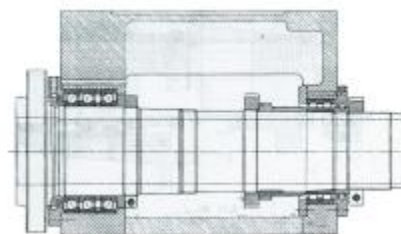


图 15 早期数控车床主轴

图 15 是廿世纪八十年代起流行的数控车床和数控铣床主轴支承系统典型的配置形式，它的前支承采用三联角接触球轴承，按中预载组配。主轴的热变形可由后支承的圆柱滚子轴承消除。

从理论计算看，在相同截面尺寸下，图 15 支承结构的主轴径向刚度是图 14 的 50%左右（以轴端挠度计）。然而实际情况并非如此，由于图 14 配置存在前支承轴颈带锥度，加工难度大，精度不易保证，锥面配合吻合度低，预紧难以掌握等问题，实际刚度比理论计算要低。而图 15 配置前支承轴颈为柱面，精度高，支承轴承精度也高，加之轴承预紧量和组配是在轴承厂预置的，处于最优状态，进而保证其有确定的刚度。

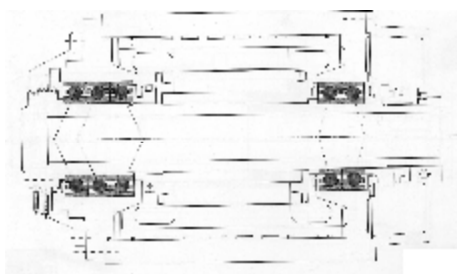


图 16 数控车床电主轴

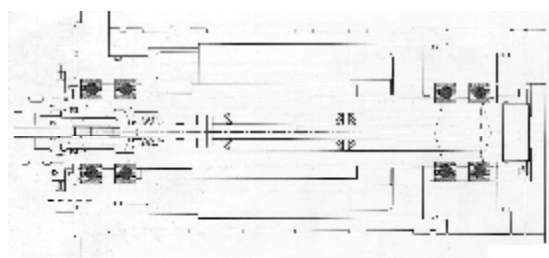


图 17 内圆磨床电主轴

图 16 是数控车床电主轴支承的典型配置形式，适用于高速切削。其前支承配置与图 15 相同，后支承采用双联角接触球轴承按轻载荷配对。这种支承配置方式的电主轴，如用脂润滑 $d_m \cdot n$ 值可达 $10 \times 10^6 \text{mm} \cdot \text{r}/\text{min}$ ，如用油气润滑， $d_m \cdot n$ 值可达 $1.3 \times 10^6 \text{mm} \cdot \text{r}/\text{min}$ 。采用这种配置的主轴由于前后支承完全处于预紧状态，因此，配合易引起附加载荷，机床热平衡前主轴快速温升引起的附加载荷往往难以计算、预测与控制，温升引起的附加轴向变形也无法消除，为此，座孔与轴承外圈一般选择微间隙配合，预紧则采用柱形弹簧或液压挡边实行定压预紧，以消除温升附加轴向力。

图 17 是高速内圈磨削电主轴和高速铣削电主轴的典型配置形式，前后支承分别安装两套按 DBA 方式配对的角接触球轴承，柱形弹簧预紧。如采用油气润滑，主轴的 $d_m \cdot n$ 值可达 $1.5 \times 10^6 \text{mm} \cdot \text{r}/\text{min}$ 。如果支承轴承为陶瓷球轴承，主轴的 $d_m \cdot n$ 值可达 $1.8 \times 10^6 \text{mm} \cdot \text{r}/\text{min}$ 。

图 18 是超高速电主轴的配置形式，前后支承分别装用一套接触角为 12° 的角接触球轴承，如果采用陶瓷球轴承，主轴的 $d_m \cdot n$ 值可达 $2.8 \times 10^6 \text{mm} \cdot \text{r}/\text{min}$ 。

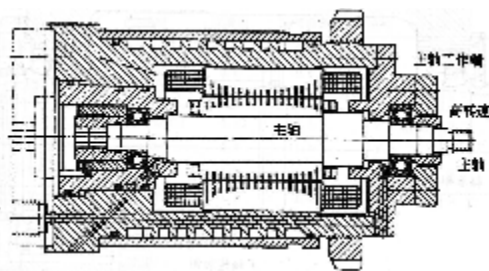


图 18 超高速电主轴

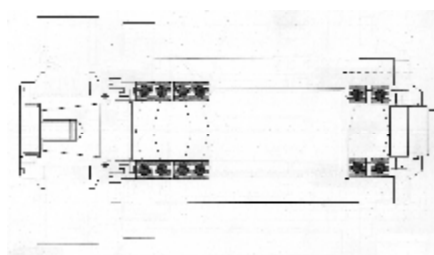


图 19 平面磨床主轴

图 19 是平面或外圆磨床主轴支承的典型配置形式。前支承采用 QBCA 或 QBCB 四联配置的角接触球轴承，后支承采用 DBA 配置。采用这种配置形式，前支承的径向刚度和角刚度较好，主轴旋转精度高，特别适应高精度外圆磨削和平面磨削，为了提高主轴旋转精度，有时所配轴承为 P2 级。另外滚动丝杠也采用这种配置形式，所配轴承为专用的滚动丝杠轴承—接触角为 60° 的推力角接触球轴承，中载荷或重载荷配置。

6. ZYS 精密机床轴承特点

随着数控技术的快速发展，机床行业对精密轴承的要求也越来越高，主要体现在高精度、高转速、高刚性、高可靠性、高适应性、低噪音、长寿命等方面。为此，ZYS 精密机床轴承在以下几个方面作了改进和提高：

6. 1 产品设计

应用有限元分析法，将设计与分析法结合在一起，推进最佳设计技术；采用拟动力学分析模型和各种暂态、稳态分析方法，对轴承进行优化设计；针对不同的工况条件，对轴承的结构进行改进，以适应不同的需求。

6. 2 材料使用

ZYS 高速精密机床轴承的套圈材料通常选用优质的含氧量低、非金属夹杂物少、组织细密的电渣重熔轴承钢，以提高轴承的使用寿命；滚动体材料有高碳铬轴承钢和陶瓷两种；保持架材料有酚醛树脂、聚酰胺、优质黄铜及有色金属等。

6. 3 制造工艺

热处理：通过淬火、清洗、回火温度及时间等工艺参数的调整、控制，减少轴承套圈中残余奥氏体的含量；利用网带炉结构特点，通过淬火温度及油温的调整、控制，减少轴承套圈零件淬火时的热应力，可大大降低薄壁、大尺寸型号轴承套圈零件的变形量；采用渗碳、碳氮共渗、冷处理、离子注入、表面涂覆、中频淬火、贝氏体等温淬火等先进的热处理工艺，可显著提高轴承套圈零件冲击韧性、显微硬度、接触疲劳寿命、耐磨性和使用寿命。零件加工：重点控制各个环节的加工精度、效率以及稳定性。

总之，ZYS 拥有专业齐全的轴承综合技术配套能力，具有轴承开发、工艺设计、装备制造、特殊检测方法和仪器设计、特种轴承材料、防锈、润滑、失效分析、噪声分析等涉及轴承设计、生产、使用全过程的综合开发能力，并在多个关键学科具有国内领先水平，能够解决复杂条件下的轴承应用问题。承担了多项国家重点工程项目的轴承配套任务，常年为国家重要决策部门提供轴承行业的综合技术咨询服务。

（姜韶峰：教授级高工，洛阳轴研科技股份有限公司精密轴承主轴公司总工程师）

BEARING • 2010

2010 上海国际轴承峰会演讲之十四（2010/9）