

第 2 章

数控机床的主传动系统

数控机床的主传动系统包括主轴电动机、传动系统和主轴组件等。与普通机床的主传动系统相比，数控机床在结构上比较简单，这是因为变速功能全部或大部分由主轴电机的无级调速来承担，省去了复杂的齿轮变速机构，有些只有二级或者三级齿轮变速系统用以扩大电机无级调速的范围。

数控机床主传动系统是机床成型运动之一，用来实现机床的主运动，它将主电动机的原动力变成可供主轴上刀具切削加工的切削力矩和切削速度。它的精度决定了零件的加工精度。为适应各种不同的加工及各种不同的加工方法，数控机床的主传动系统应具有较大的调速范围，较高的精度与刚度，并尽可能降低噪声与热变形，从而获得最佳的生产率、加工精度和表面质量。数控机床的主传动运动是指生产切屑的传动运动，它是通过主传动电机拖动的。例如，数控车床上主轴带动工件的旋转运动，立式加工中心上主轴带动铣刀、镗刀和绞刀等的旋转运动。

2.1 对数控机床主传动系统的要求与特点

2.1.1 数控机床对主传动系统的要求

- ① 调速范围宽、并实现无级调速。
- ② 高精度与刚度、低噪声。
- ③ 高抗振性、高热稳定性。

2.1.2 数控机床主传动系统的特点

(1) 较高的主轴转速和较宽的调速范围并实现无级调速。

由于数控机床工艺范围宽、工艺能力强，为满足各种工况的切削，获得最合理的切削用量，从而保证加工精度、加工表面质量及高的生产效率，必须具有较高的转速和较大的调速范围。特别是对于具有自动换刀装置的加工中心，为适应各种刀具、各种材料的加工，对主

轴的调速范围要求更高。它能使数控机床进行大功率切削和高速切削,实现高效率加工,比同类型普通机床主轴最高转速高出两倍以上。

(2) 较高的精度和较大的刚度。

为了尽可能提高生产率和提供高效率的强力切削,在数控加工过程中,零件最好经过一次装夹就完成全部或绝大部分切削加工,包括粗加工和精加工。在加工过程中机床是在程序控制下自动运行的,更需要主轴部件刚度和精度有较大余量,从而保证数控机床使用过程中的可靠性。

(3) 良好的抗振性和热稳定性。

数控机床加工时,由于断续切削、加工余量不均匀、运动部件不平衡以及切削过程中的自振等原因引起冲击力和交变力,使主轴产生振动,影响加工精度和表面粗糙度,严重时甚至可能破坏刀具和主轴系统中的零件,使其无法工作。主轴系统的发热使其中所有零部件产生热变形,降低传动效率,破坏零部件之间的相对位置精度和运动精度,从而造成加工误差。因此,主轴部件要有较高的固有频率,较好的动平衡,且要保持合适的配合间隙,并要进行循环润滑。

(4) 为实现刀具的快速或自动装卸,数控机床主轴具有特有的刀具安装结构。

比如主轴上设计有刀具自动装卸、主轴定向停止和主轴孔内的切屑清除装置。

2.2 数控机床主轴的传动方式与主传动系统类型

2.2.1 数控机床主轴的传动方式

(1) 齿轮传动方式。

如图2-1所示的齿轮传动方式,一般大、中型数控机床多采用这种方式。它通过几对齿轮降速,扩大了输出扭矩,确保低速时的主轴输出扭矩特性的要求。有一部分小型数控机床也采用这种传动方式,以获得强力切削时所需要的扭矩。

机械变速机构常采用滑移齿轮变速机构,它的移位大多采用液压拨叉和电磁离合器两种变速操纵方法。

① 液压拨叉变速。在带有齿轮传动的主传动系统中,齿轮的换挡主要靠液压拨叉来完成。图2-2是三位液压拨叉的原理图。

滑移齿轮的拨叉与变速液压缸的活塞杆连接,通过改变不同通油方式可以使三联齿轮获

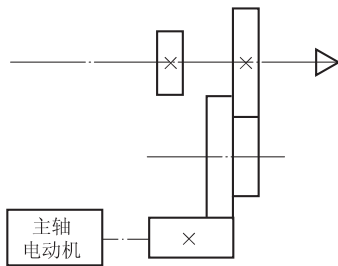


图 2-1 齿轮传动方式

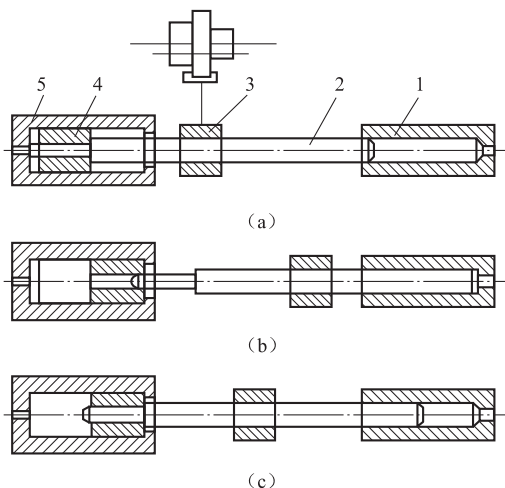


图 2-2 三位液压拨叉工作原理图

1、5—液压缸；2—活塞杆；3—拨叉；4—套筒

得三个不同的变速位置，带动滑移齿轮移动实现变速。这套机构除液压缸和活塞杆外，还增加了套筒 4，如图 2-2（a）所示。当液压缸 1 通压力油，液压缸 5 卸压时，活塞杆 2 带动拨叉 3 向左移动到极限位置，同时拨叉带动三联齿轮移到左端啮合位置，行程开关发出信号，如图 2-2（b）所示。当液压缸 5 通压力油而液压缸 1 卸压时，活塞杆 2 和套筒 4 一起向右移动，套筒 4 碰到液压缸 5 的端部之后，活塞杆 2 继续右移到极限位置，此时三联齿轮被拨叉 3 移到右端啮合位置，行程开关发出信号，如图 2-2（c）所示。当压力油同时进入左右两液压缸时，由于活塞杆 2 两端直径不同使活塞杆向左移动，在设计活塞杆 2 和套筒 4 的截面面积时，应使油压作用

在套筒 4 的圆环上向右的推力大于活塞杆 2 向左的推力，因而套筒 4 仍然压在液压缸 5 的右端，使活塞杆 2 紧靠在套筒 4 的右端，此时，拨叉和三联齿轮被限制在中间位置，行程开关发出信号。

液压叉变速必须在主轴停车之后才能进行，但停车时拨叉拨动滑移齿轮啮合又可能产生“顶齿”现象。因此，在这种主运动系统中通常设有一台微电动机，它在拨叉移动齿轮的同时带动各传动齿轮作低速回转，这样就可以使滑移齿轮顺利啮合。

液压拨叉变速是一种有效的方法，但它需要配置液压系统。

② 电磁离合器变速。电磁离合器是应用电磁效应或切断运动的元件，由于它便于实现自动操作，并有现成的系列产品选用，因而它已成为自动装置中常用的操纵元件。电磁离合器用于数控机床主传动时，能简化变速机构，通过若干个安装在各传动轴上的离合器的吸和与分离的不同组合来改变齿轮的传动路线，实现主轴转速。

如图 2-3 所示为 THK6380 型自动换刀数控铣镗床的主传动系统图，该机床采用双速电机和六个电磁离合器完成 18 级变速。

如图 2-4 所示为数控铣镗床主轴箱中使用的无滑环摩擦片式电磁离合器。传动齿轮 1 通过螺钉固定在联接件 2 的端面上，根据不同的传动结构，运动既可以从齿轮 1 输入，也可以从套筒 3 输入。联接件 2 的外周开有六条直槽，并与外摩擦片 4 上的六个花键齿相匹配，这样就把齿轮 1 的转动直接传递给外摩擦片 4。套筒 3 的内孔和外圆都有花键，而且和挡环 6 用螺钉 11 连成一体。内摩擦片 5 通过内孔花键套装在套筒 3 上，并一起转动。当线圈 8 通电时，衔铁 10 被吸引右移，把内摩擦片 5 和外摩擦片 4 压紧在挡环 6 上，通

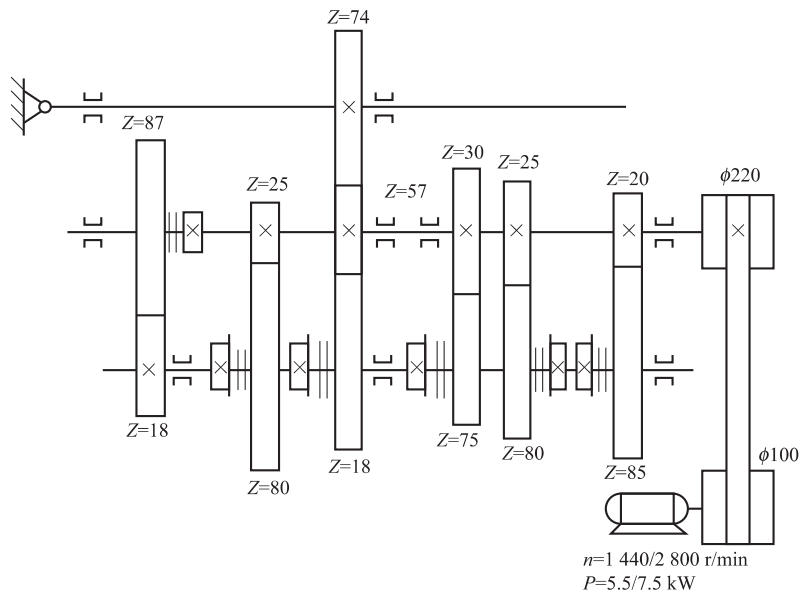


图 2-3 THK6380 型自动换刀数控铣镗床的主传动系统

过摩擦力矩把齿轮 1 与套筒 3 结合在一起。无滑环电磁离合器的线圈 8 和铁心 9 是不转动的，在铁心 9 的右侧均匀分布着六条键槽，用斜键将铁心固定在变速箱的壁上。当线圈 8 断电时，外摩擦片 4 的弹性爪使衔铁 10 迅速恢复到原来位置，内、外摩擦片互相分离，运动被切断。这种离合器的优点在于省去了电刷，避免了磨损和接触不良带来的故障，因此比较适合于高速运转的主运动系统。由于采用摩擦片来传递转矩，所以允许不停车变速。但也带来了另外的缺点，这就是变速时将产生大量的摩擦热，还由于线圈和铁心是静止不动的，这就必须在旋转的套筒上装滚动轴承 7，因而增加了离合器的径向尺寸。此外，这种摩擦离合器的磁力线通过钢质的摩擦片，在线圈断电之后会有剩磁，所以增加了离合器的分离时间。

如图 2-5 所示为啮合式电磁离合器，其特点是在摩擦面上做了一定的齿形，来提高传递的扭力。当线圈 1 通电后，带有端面齿的衔铁 2 被吸引和磁轭 9 的端面齿互相啮合。衔铁 2 又通过渐开线花键与定位环 5 相联，再通过螺钉 7 与传动件相联。隔离环 6 是防止传动轴分离一部分磁力线，进而削弱电磁吸引力。衔铁采用渐开线花键与定位环 5 相联是为了保证同轴度。采用螺钉 3 和压力弹簧 4 的结构，能使离合器的安装方式不受限制，不管衔铁是水平还是垂直，是向上还是向下安装，都能保证合理的齿面间隙。

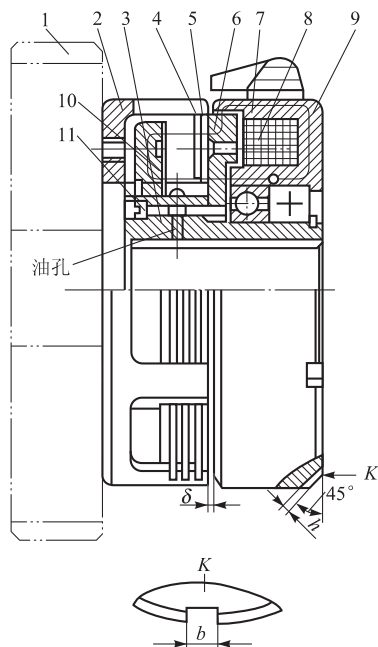


图 2-4 无滑环摩擦片式电磁离合器

- 1—传动齿轮；2—联接件；3—套筒；
4—外摩擦片；5—内摩擦片；6—挡环；
7—滚动轴承；8—绕组；9—铁心；
10—衔铁；11—螺钉

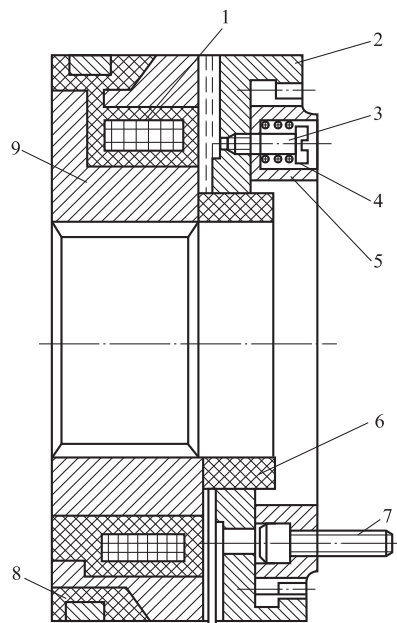


图 2-5 啮合式电磁离合器

- 1—线圈；2—衔铁；3—螺钉；
4—弹簧；5—定位环；6—隔离环；
7—联接螺钉；8—旋转集电环；
9—磁轭

与其他型式的电磁离合器相比，啮合式电磁离合器能够传递更大的转矩，因而相应地减小了离合器的径向和轴向尺寸，使主轴箱的结构更为紧凑。啮合过程无滑动是它的另一个优点，这样不但使摩擦热减少，有助于改善数控机床主轴箱的热变形，而且还可以在有严格要求的传动比的传动链中使用。但这种离合器带有旋转集电环 8，电刷与滑环之间有摩擦，影响了变速的可靠性，而且还应避免在很高的转速下工作。另一方面，离合器必须在低于 1 ~ 2 r/min 的转速下变速，这将给自动变速带来不便。根据上述特点，啮合式电磁离合器较适宜于在要求温升小和结构紧凑的数控机床上使用。

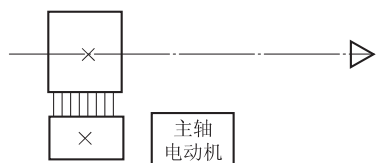


图 2-6 带传动方式

(2) 带传动方式。

如图 2-6 所示为带传动方式，这种方式主要应用在转速较高、变速范围不大的小型数控机床上，电动机本身的调整就能满足要求，不用齿轮变速，可避免齿轮传动时引起振动和噪声的缺点，但它只适用于低扭矩特性要求。常用的有同步齿形带、多楔带、V 带、平带、V

形带。

① 同步齿形带。数控机床上常采用同步齿形带传动，如图 2-7 所示，它是一种综合了带、链传动优点的新型传动方式。同步齿形带的带型有 T 形齿和圆弧齿，如图 2-8 所示，同步齿形带的结构和传动。带的工作面及带轮外圆上均制成齿形，通过带轮与轮齿相嵌合，作无滑动的啮合传动。带内采用了加载后无弹性伸长的材料作强力层，以保持带的节距不变，可使主、从动带轮作无相对滑动的同步传动。与一般带传动相比，同步齿形带传动具有如下优点：

- 传动效率高，可达 98% 以上。
- 无滑动，传动比准确。
- 传动平稳，噪声小。
- 使用范围较广，速度可达 50 m/s，速比可达 10 左右，传递功率由几瓦至数千瓦。
- 维修保养方便，不需要润滑。
- 安装时中心距要求严格，带与带轮制造工艺较复杂，成本高。

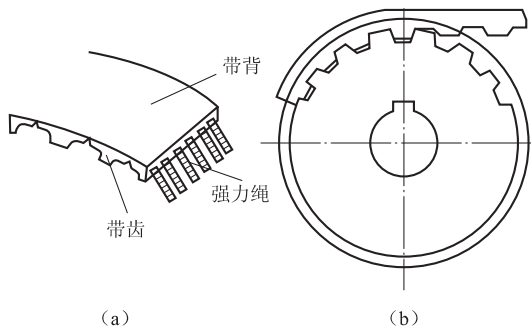


图 2-7 同步齿形带的结构与传动
(a) 结构；(b) 传动



图 2-8 同步齿形带

② 多楔带。数控机床上应用的多楔带又称复合三角带，横向断面呈多个楔形如图 2-9 所示，楔角为 40° ，传递负载主要靠强力层。强力层中有多根钢丝绳或涤纶绳，具有较小伸长率、较大的抗拉强度和抗弯疲劳强度。带的基底及缓冲楔部分采用橡胶或聚氨酯。多楔带综合了 V 带和平带的优点，运转时振动小、发热少、运转平稳、重量轻，因此可在 40 m/s 的线速度下使用。此外，多楔带与带轮的接触好，负载分布均匀，即使瞬时超载，也不会产生打滑，而传动功率比 V 带大 20% ~ 30%，因此能够满足主传动要求的高速、大转矩和不打滑的要求。多楔带安装时需较大的张紧力，使得主轴和电动机承受较大的径向负载，这是多楔带的一大缺点。

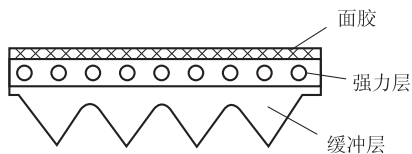


图 2-9 多楔带

多楔带按齿距分为三种规格：J 型齿距为 2.4 mm，L 型齿距为 4.8 mm，M 型齿距为 9.5 mm，依据功率转速选择图可选出所需的型号。

（3）调速电动机直接驱动主轴传动方式。

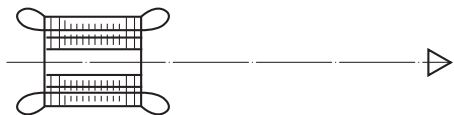


图 2-10 调速电动机直接驱动主轴传动方式

如图 2-10 所示为调速电动机直接驱动主轴传动方式。这种主传动是电动机直接带动主轴运动，如图 2-11 所示。因此，大大地简化了主轴箱体与主轴的结构，有效地提高了主轴部件的刚度。其优点是主轴部件结构紧凑、重量轻、惯性小，可提高启动和停止的响应特性，有利于控制振动和噪声；缺点是电动机运转产生的热量使主轴产生热变形，并且主轴输出扭矩较小，电动机发热对主轴的精度影响较大。

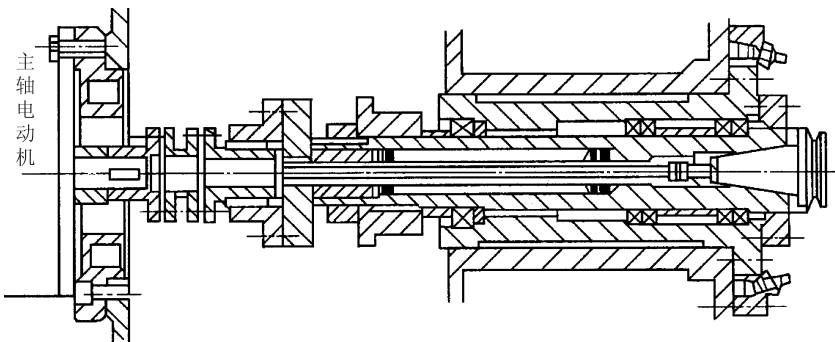


图 2-11 直接驱动式

近年来，出现了一种新式的内装电动机主轴，即主轴与电动机转子合为一体。其优点是主轴部件结构紧凑、惯性小、重量轻，可提高启动、停止的响应特性，有利于控制振动和噪声；缺点是电动机运转产生的热量使主轴产生热变形，因此温度控制和冷却是使用内装电动机主轴的关键问题。图 2-12 为日本研制的立式加工中心主轴组件，其内装电动机主轴的最高转速可达 50 000 r/min。

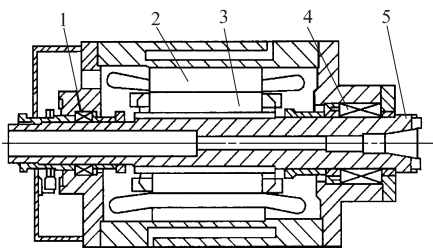


图 2-12 立式加工中心主轴组件

1—后轴承；2—定子；3—转子；
4—前轴承；5—主轴

2.2.2 数控机床主传动系统类型

目前，数控机床主传动系统大致可以分为以下几种类型。

（1）经过一级变速的主传动。

如图 2-13 所示，一级变速目前多用 V 带或同步带来完成，其优点是结构简单、安装

调试方便,且在一定程度上能够满足转速与转矩输出要求,但主轴调速范围比和电动机一样,受电动机调速范围比的约束。

(2) 带有变速齿轮的主传动。

如图2-14所示,带有变速齿轮的主传动一般在大、中型数控机床中应用较多。它通过少数几对齿轮降速,使之成为分段无级变速,确保低速大转矩,以满足主轴输出转矩特性的要求。

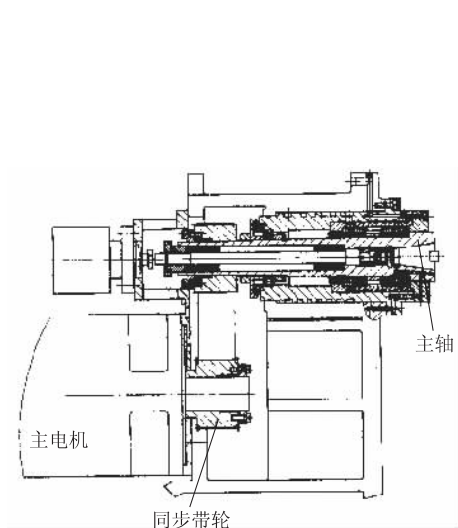


图2-13 通过带传动的主传动

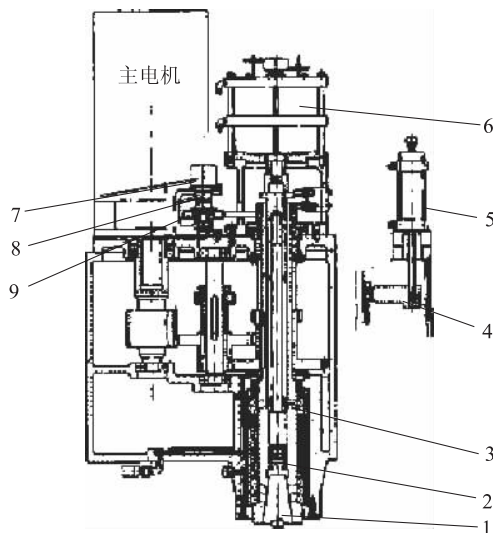


图2-14 带有变速齿轮的主传动

1—主轴;2—弹簧卡头;3—螺形弹簧;4—拨叉;5—变速液压缸;
6—松刀汽缸;7—编码器;8—联轴器;9—同步带轮

(3) 电动机与主轴直联的主传动。

如图2-15所示,这种传动方式的优点是结构紧凑,但主轴转速的变化及转矩的输出和电动机的输出特性不一致,因而使用上受到一定限制。

(4) 电主轴。

电主轴通常作为现代机电一体化的功能部件,装备在高速数控机床上,如图2-16所示。其主轴部件结构紧凑、重量轻、惯量小,可提高启动和停止的响应特性,有利于控制振动和噪声;缺点是制造和维护困难且成本较高。电动机运转产生的热量直接影响主轴,主轴的热变形严

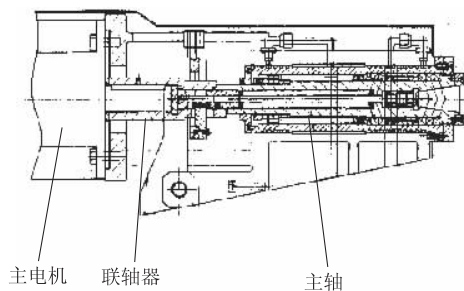


图2-15 电动机与主轴直联的主传动

重影响机床的加工精度，因此合理选用主轴轴承以及润滑、冷却装置十分重要。

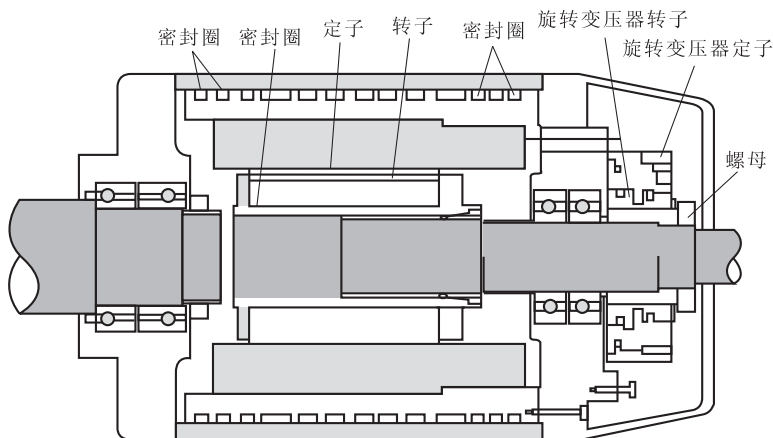


图 2-16 电主轴

虽然电主轴外形各不相同，但其实质都是一只转子中空的电动机。外壳有进行强制冷却的水槽，中空套筒用于直接安装各种机床主轴，从而取消了从主电动机到主轴之间的机械传动环节（如传动带、齿轮、离合器等），实现了主电动机与机床主轴的一体化，使机床的主传动系统实现了所谓的“零传动”。主轴部件采用电主轴的传动方式有以下特点。

① 机械结构最为简单，转动惯量小，因而快速响应性好，能实现极高的速度、加（减）速度和定角度的快速准停（*C* 轴控制）。

② 通过采用交流变频调速或磁场矢量控制的交流主轴驱动装置，输出功率大，调速范围宽，并有比较理想的转矩—功率特性。

③ 可以实现电主轴部件的单元化。电主轴可独立做成标准功能部件，并由专业厂进行系列化生产；机床生产厂只需根据用户的不同要求进行选用，可很方便地组成各种性能的高速机床，符合现代机床设计模块化的发展方向。

另外，电主轴在数控机床应用中，根据电主轴和主轴轴承相对位置的不同，高速电主轴有两种安装形式。

① 主电动机置于主轴前、后轴承之间。这种方式的优点是：主轴单元的轴向尺寸较短，主轴刚度高，出力大，较适用于中、大型高速加工中心，目前大多数加工中心都采用这种结构形式。

② 主电动机置于主轴后轴承之后，即主轴箱和主电动机作轴向的同轴布置（有的用联轴器）。这种布局方式有利于减少电主轴前端的径向尺寸，电动机的散热条件也较好。但整个主轴单元的轴向尺寸较大，常用于小型高速数控机床，尤其适用于模具型腔的高速精密加工。

2.3 主轴部件

主轴部件作为数控机床的一个关键部件，它包括主轴、主轴的支承、安装在主轴上传动件和密封件等。主轴部件质量的好坏直接影响加工质量，对于数控机床，尤其是自动换刀数控机床，为了实现刀具在主轴上的自动装卸与夹紧，还必须有刀具的自动夹紧装置、主轴准停装置和主轴孔的清理装置等结构。

数控机床主轴部件是影响机床加工精度的主要部件，它的回转精度影响工件的加工精度，它的功率大小与回转速度影响加工效率，它的自动变速、准停和换刀等功能影响机床的自动化程度。因此，主轴部件应满足以下几个方面的要求：高回转精度、刚度、抗振性、耐磨性和热稳定性等。而且在结构上必须很好地解决刀具和工具的装夹、轴承的配置、轴承间隙调整和润滑密封等问题。

主轴的结构根据数控机床的规格、精度采用不同的主轴轴承。一般中小规格数控机床的主轴部件多采用成组高精度滚动轴承，重型数控机床则采用液体静压轴承，高速主轴常采用氮化硅材料的陶瓷滚动轴承。

2.3.1 数控机床的主轴

(1) 主轴端部结构形式。

主轴端部用于安装刀具或夹持工件的夹具，在设计上应能保证定位准确、安装可靠、联接牢固、装卸方便，并能传递足够的扭矩。主轴端部的结构形状都已标准化了，如图2-17所示为几种机床上通用的结构形式。

如图2-17(a)所示为数控车床主轴端部，卡盘靠前端的短圆锥面和凸缘端面定位，用拨销传递扭矩，卡盘装有固定螺栓，卡盘装于主轴端部时，螺栓从凸缘上的孔中穿过，转动快卸卡板将数个螺栓同时卡住，再拧紧螺母将卡盘固定在主轴端部。主轴为空心，前端有莫氏锥度孔，用以安装顶尖或心轴。

如图2-17(b)所示为数控铣、镗床的主轴端部，主轴前端有7:24的锥孔，用于装夹铣刀柄或刀杆。主轴端面有一端面键，既可通过它传递刀具的扭矩，又可用于刀具的轴向定位，并用拉杆从主轴后端拉紧。

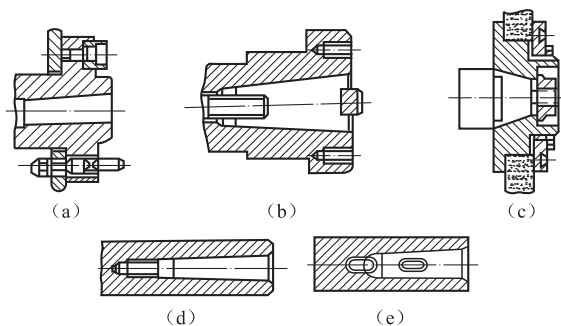


图2-17 主轴部件的结构形式

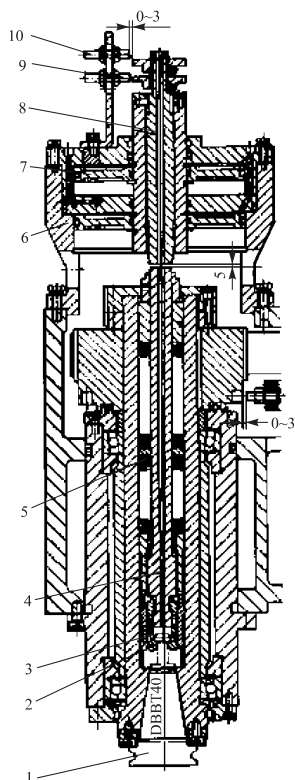


图 2-18 刀具自动卡紧机构

- 1—刀柄；2—刀爪；3—内套；
4—拉杆；5—弹簧；6—汽缸；
7—活塞；8—压杆；
9—撞块；10—行程开关

刀具即可由机械手或刀库拔出。待新刀装入后，汽缸 6 的下腔通压缩空气。在碟形弹簧的作用下，活塞带动抓刀爪上移，抓刀爪拉杆重新进入内套 3，将刀柄拉紧。活塞 7 移动的两个极限位置分别设有行程开关 10，作为刀具夹紧和松开的信号。

刀杆尾部的拉紧机构，除上述的卡爪式外，常见的还有钢球拉紧机构，其内部结构如图 2-19 所示。

2.3.2 主轴的材料与热处理

主轴材料可根据强度、刚度、耐磨

如图 2-17 (c) 所示为外圆磨床砂轮主轴的端部，如图 2-17 (d) 所示为内圆磨床砂轮主轴端部，如图 2-17 (e) 所示为钻床与普通镗床锤杆端部，刀杆或刀具由莫氏锥孔定位，用锥孔后端第一扁孔传递扭矩，第二个扁孔用以拆卸刀具。但在数控镗床上要使用如图 2-17 (b) 所示的形式，图中 7:24 的锥孔没有自锁作用，便于自动换刀时拔出刀具。

(2) 刀具自动夹紧机构。

加工中心可以自动换刀，所以主轴系统应具备自动松开和夹紧刀具的功能。在自动换刀机床的刀具自动夹紧机构中，刀杆常采用 7:24 的大锥度锥柄，既利于定心，也为松刀带来方便。用碟形弹簧通过拉杆及夹头拉住刀柄的尾部，使刀具锥柄和主轴锥孔紧密配合，夹紧力达 10 000 N 以上。松刀时，通过液压缸活塞推动拉杆来压缩碟形弹簧，使夹头涨开，夹头与刀柄上的拉钉脱离，刀具即可拔出进行新旧刀具的交换；新刀装入后，液压缸活塞后移，新刀具又被碟形弹簧拉紧。

刀具的自动夹紧机构安装在主轴的内部，图 2-18 所示为刀具的夹紧状态。刀柄 1 由主轴抓刀爪 2 夹持，碟形弹簧 5 通过拉杆 4、抓刀爪 2 在内套 3 的作用下将刀柄的拉钉拉紧，当换刀时，要求松开刀柄。此时将主轴上端气缸的上腔通压缩空气，活塞 7 带动压杆 8 及拉杆 4 向下移动。同时压缩碟形弹簧 5，当拉杆 4 下移到使抓刀爪 2 的下端移出内套 3 时，卡爪张开。同时拉杆 4 将刀柄顶松，

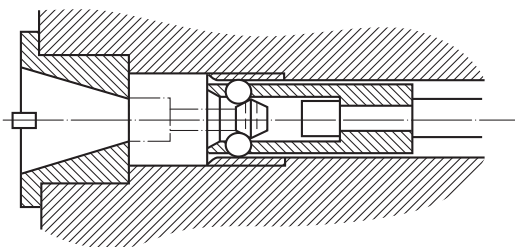


图 2-19 钢球拉紧机构

性、载荷特点和热处理变形大小等因素来选择。主轴刚度与材质的弹性模量 E 有关。无论是普通钢还是合金钢，其 E 值基本相同。因此，对于一般要求的机床其主轴可用价格便宜的中碳钢、45 钢，进行调质处理后硬度为 22 ~ 28 HRC；当载荷较大或存在较大的冲击时，或者精密机床的主轴为减少热处理后的变形，或者需要作轴向移动的主轴为了减少它的磨损时，则可选用合金钢。常用的合金钢有 40 Cr 进行淬硬使硬度达到 40 ~ 50 HRC；或者用 20 Cr 进行渗碳淬硬使硬度达到 56 ~ 62 HRC。某些高精度机床的主轴材料则选用 38CrMoAl 进行氮化处理，使硬度达到 850 ~ 1 000 HVC。

2.3.3 数控机床主轴部件的支承

机床主轴带着刀具或夹具在支承中进行回转运动，应能传递切削转矩承受切削抗力，并保证必要的旋转精度。机床主轴多采用滚动轴承作为支承，对于精度要求高的主轴则采用动压或静压滑动轴承作为支承。下面着重介绍主轴部件所用的滚动轴承。

1. 主轴轴承的类型

(1) 滚动轴承。

如图 2-20 所示为主轴常用的几种滚动轴承。

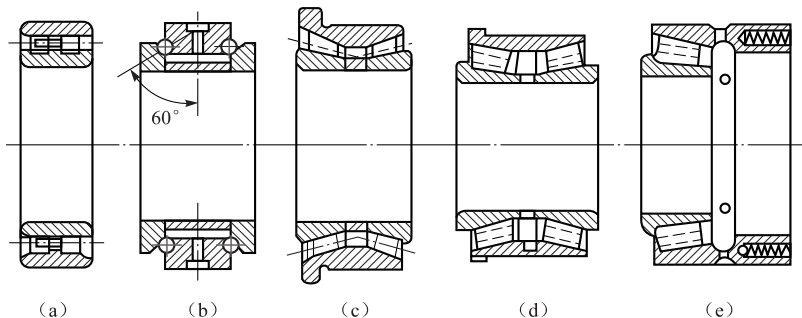


图 2-20 主轴常用的滚动轴承

如图 2-20 (a) 所示为锥孔双列圆柱滚子轴承，内圈为 1:12 的锥孔，当内圈沿锥形轴颈轴向移动时，内圈胀大以调整滚道的间隙。滚子数目多，两列滚子交错排列，因而承载能力大，刚性好，允许转速高。它的内、外圈均较薄，因此，要求主轴颈与箱体孔均有较高的制造精度，以免轴颈与箱体孔的形状误差使轴承滚道发生畸变而影响主轴的旋转精度。该轴承只能承受径向载荷。

如图 2-20 (b) 所示是双列推力角接触球轴承，接触角为 60° ，球径小，数目多，能承受双向轴向载荷。磨薄中间隔套可以调整间隙或预紧，轴向刚度较高，允许转速高。该轴承一般与双列圆柱滚子轴承配套用做主轴的前支承，其外圈外径为负偏差，只承受轴向载荷。

如图 2-20 (c) 所示是双列圆锥滚子轴承，它有一个公用外圈和两个内圈，由外圈的

凸肩在箱体上进行轴向定位，箱体孔可以镗成通孔。磨薄中间隔套可以调整间隙或预紧，两列滚子的数目相差一个，能使振动频率不一致，明显改善轴承的动态性。这种轴承能同时承受径向和轴向载荷，通常用做主轴的前支承。

如图 2-20 (d) 所示为带凸肩的双列圆柱滚子轴承，结构上与图 2-20 (c) 相似，可用做主轴前支承。滚子做成空心的，保持架为整体结构，充满滚子之间的间隙，润滑油由空心滚子端面流向挡边摩擦处，可有效地进行润滑和冷却。空心滚子承受冲击载荷时可产生微小变形，能增大接触面积并有吸振和缓冲作用。

如图 2-20 (e) 所示为带预紧弹簧的圆锥滚子轴承，弹簧数目为 16~20 根，均匀增减弹簧可以改变预加载荷的大小。

滚动轴承的精度：主轴部件所用滚动轴承的精度有高级 E、精密级 D、特精级 C 和超精级 B。前支承的精度一般比后支承的精度高一级，也可以用相同的精度等级。普通精度的机床通常前支承取 C、D 级，后支承用 D、E 级。特高精度的机床前后支承均用 B 级精度。

滚动轴承特点：摩擦系数小，能够预紧，润滑维护简单，并且在一定的转速范围和载荷变动范围内能稳定地工作等。但是它噪声大，滚动体数目有限，刚度变化大，抗振性差，并且限制转速。一般数控机床的主轴轴承可以使用滚动轴承，特别是立式主轴和装在套筒内能作轴向移动的主轴，为了适应主轴高速发展的要求，滚动轴承的滚珠也可采用陶瓷滚珠。

(2) 滑动轴承。

如图 2-21 所示，静压滑动轴承的油膜压强由液压缸从外界供给，与主轴转速的高低无关，承载能力不随转速而变化，而且无磨损，启动和运转时摩擦力矩相同。所以静压轴承的回转精度高，刚度大。但是静压轴承需要一套液压装置，成本较高，污染大。

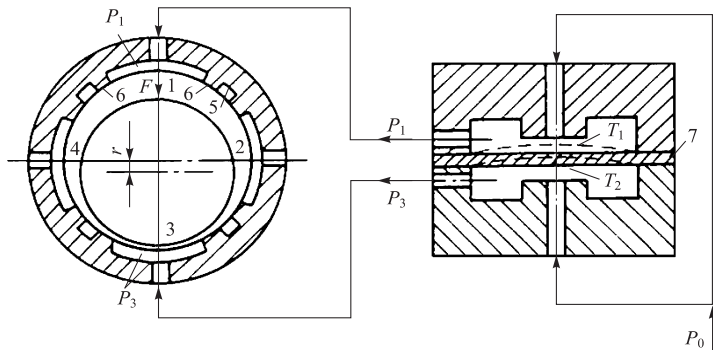


图 2-21 静压轴承

2. 主轴轴承的配置

在实际应用中，数控机床主轴轴承常见的配置有下列三种形式。

如图 2-22 所示为前支承采用双列圆柱滚子轴承和 60°角接触球轴承的组合，后支承采

用成对角接触球轴承。这种结构配置形式是现代数控机床主轴结构中刚性最好的一种。它使主轴的综合刚度得到大幅度提高,可以满足强力切削的要求,所以目前各类数控机床的主轴普遍采用这种配置形式。

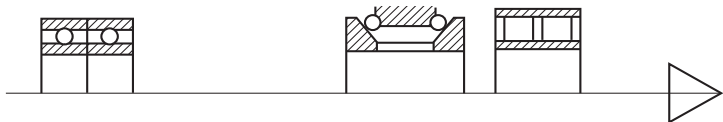


图 2-22 前支承采用双列圆柱滚子轴承和 60°角接触球轴承的组合

如图 2-23 所示为前支承采用高精度双列(或三列)角接触球轴承,后支承采用单列(或双列)角接触球轴承。这种结构配置形式具有较好的高速性能,主轴最高转速可达 4 000 r/min,但这种轴承的承载能力小,因而适用于高速、轻载和精密的数控机床主轴。

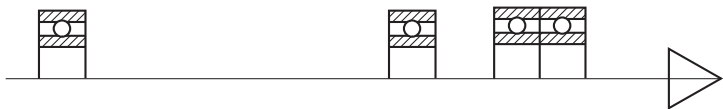


图 2-23 前支承采用高精度三列角接触球轴承组合方式

如图 2-24 所示为前后支承采用双列和单列圆锥滚子轴承。这种轴承径向和轴向刚度 高,能承受重载荷,尤其能承受较大的动载荷,安装与调整性能好。但是这种轴承配置方式 限制了主轴的最高转速和精度,所以仅适用于中等精度、低速与重载的数控机床主轴。



图 2-24 前后支承采用双列和单列圆锥滚子轴承

主轴支承的典型结构:

如图 2-25 所示为数控车床主轴支承结构,前支承采用双列短圆柱滚子轴承承受径向载荷和 60°角接触双列向心推力球轴承承受轴向载荷,后支承采用双列短圆柱滚子轴承,适用于中等转速,主轴刚性高,能承受较大的切削负载。

如图 2-26 所示为卧式铣床主轴支承结构,轴的径向刚度好,并有较高的转速。

如图 2-27 所示为卧式镗铣床主轴部件的支承,这种支承方式可以承受双向轴向载荷和 径向载荷,承载能力大,刚性好,结构简单。

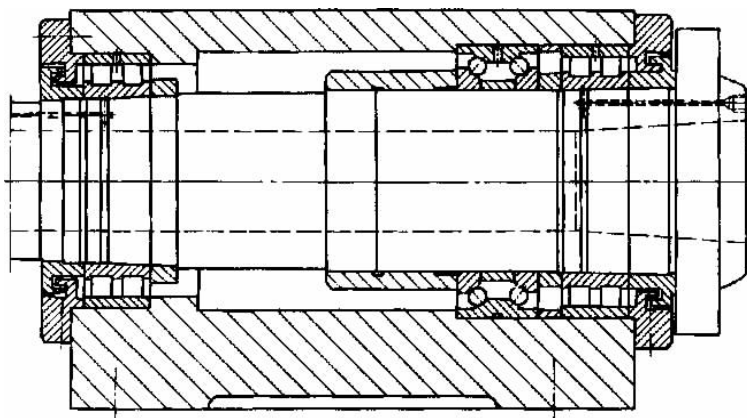


图 2-25 数控车床主轴支承结构

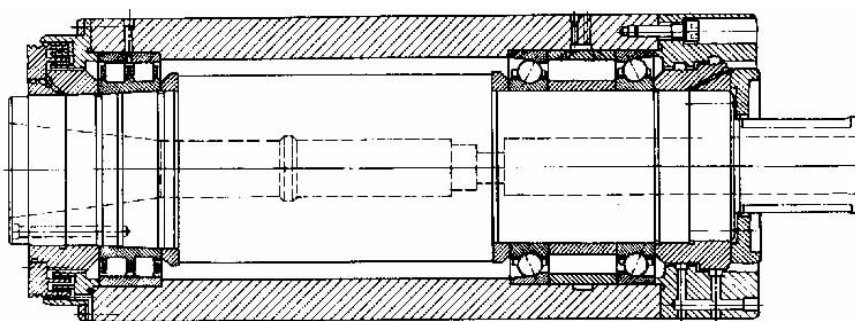


图 2-26 卧式铣床主轴支承结构

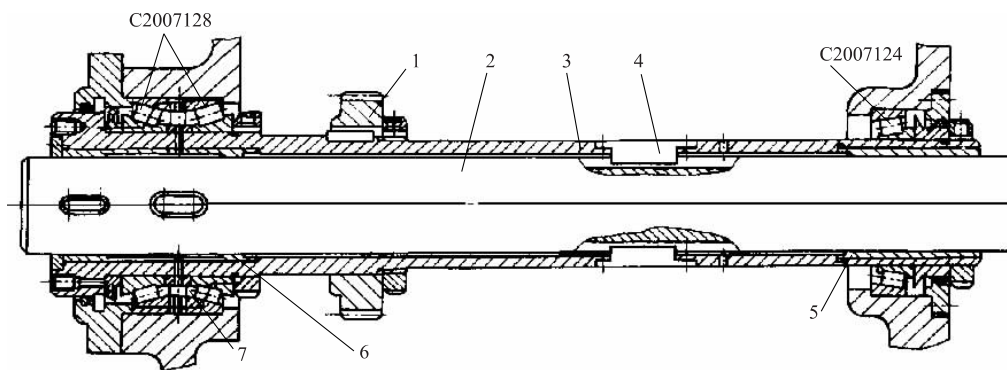


图 2-27 卧式镗铣床主轴部件的支承

2.3.4 主轴轴承的装配

采用选配定向法进行装配可提高主轴部件的精度,并且尽可能使主轴支承孔与主轴轴颈的偏心量和轴承内圈与滚道的偏心量接近,并使其方向相反。

此外,在维修机床拆装主轴轴承时,因原生产厂家已调整好轴承的偏心位置,所以要在拆卸前做好轴向位置记号。

2.3.5 主轴滚动轴承的预紧

所谓轴承的预紧,是使轴承滚道预先承受一定的载荷,消除间隙并使得滚动体与滚道之间发生一定的变形,增大接触面积,轴承受力时变形减小,抵抗变形的能力增大。

将滚动轴承进行适当预紧,使滚动体与内外圈滚道在接触处产生预变形,使受载后承载的滚动体数量增多,受力趋向均匀,从而提高承载能力和刚度,有利于减少主轴回转轴线的漂移,提高旋转精度。若过盈量太大,轴承磨损加剧,承载能力将显著下降,主轴组件必须具备轴承间隙的调整结构。

因此,对主轴滚动轴承进行预紧和合理选择预紧量,可以提高主轴部件的回转精度、刚度和抗振性,机床主轴部件在装配时要对轴承进行预紧,使用一段时间以后,间隙或过盈有了变化,还得重新调整,所以要求预紧结构应便于调整。滚动轴承间隙的调整或预紧,通常是使轴承内、外圈相对轴向移动来实现的。常用的方法有以下几种。

(1) 轴承内圈移动。

如图2-28所示,这种方法适用于锥孔双列圆柱滚子轴承。用螺母通过套筒推动内圈在锥形轴颈上作轴向移动,使内圈变形涨大,在滚道上产生过盈,从而达到预紧的目的。

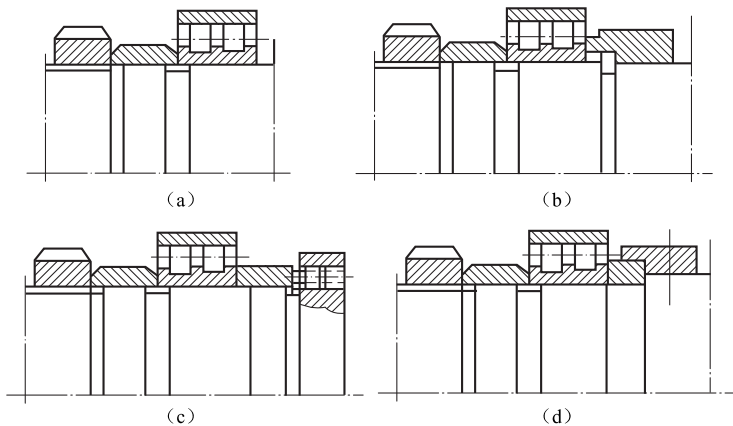


图2-28 滚动轴承的预紧

如图 2-28 (a) 所示结构简单, 但预紧量不易控制, 常用于轻载机床主轴部件。如图 2-28 (b) 所示用右端螺母限制内圈的移动量, 易于控制预紧量。如图 2-28 (c) 所示在主轴凸缘上均匀分布数个螺钉以调整内圈的移动量, 调整方便, 但是用几个螺钉调整, 易使垫圈歪斜。如图 2-28 (d) 所示将紧靠轴承右端的垫圈做成两个半环, 可以径向取出, 修磨其厚度可控制预紧量的大小, 调整精度较高。调整螺母一般采用细牙螺纹, 便于微量调整, 而且在调好后要能锁紧防松。

(2) 修磨座圈或隔套。

如图 2-29 (a) 所示为轴承外围宽边相对 (背对背) 安装, 这时修磨轴承内圈的内侧; 如图 2-29 (b) 所示为外围窄边相对 (面对面) 安装, 这时修磨轴承外圈的窄边。在安装时按图示的相对关系装配, 并用螺母或法兰盖将两个轴承轴向压拢, 使两个修磨过的端面贴紧, 这样使用两个轴承的滚道之间产生预紧。另一种方法是将两个厚度不同的隔套放在两轴承内、外圈之间, 同样将两个轴承轴向相对压紧, 使滚道之间产生预紧, 如图 2-30 (a)、(b) 所示。

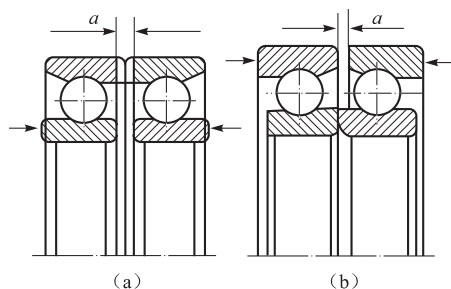


图 2-29 修磨轴承座圈

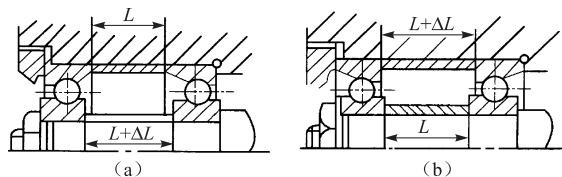


图 2-30 隔套的应用

2.3.6 主轴内切屑清除装置

自动清除主轴孔内的灰尘和切屑是换刀过程中的一个不容忽视的问题。如果主轴锥孔中落入了切屑、灰尘或其他污物, 在拉紧刀杆时, 锥孔表面和刀杆的锥柄就会被划伤, 甚至会使刀杆发生偏斜, 破坏了刀杆的正确定位, 影响零件的加工精度, 甚至会使零件超差报废。为了保持主轴锥孔的清洁, 常采用的方法是使用压缩空气吹屑。在活塞推动拉杆松开刀柄的过程中, 压缩空气由喷气头经过活塞中心孔和拉杆中的孔吹出, 将锥孔清理干净, 防止主轴锥孔中掉入切屑和灰尘, 把主轴孔表面和刀杆的锥柄划伤, 保证刀具的正确位置。为了提高吹屑效率, 喷气小孔要有合理的喷射角度, 并均匀布置。

2.4 主轴准停与主轴的同步运行功能

2.4.1 主轴准停功能与控制

数控机床为了完成 ATC（刀具自动交换）的动作过程，必须设置主轴准停机构。由于刀具装在主轴上，切削时切削转矩不可能仅靠锥孔的摩擦力来传递，因此主轴前端设置一个凸键，当刀具装入主轴时，刀柄上的键槽必须与凸键对准，才能顺利换刀。为此，主轴必须准确停在某固定的角度上。由此可知主轴准停是实现 ATC 过程的重要环节。

当主轴停止时每次机械手自动装取刀具，必须保证刀柄上的键槽对准主轴的端面键，为满足主轴这一功能而设计的装置称为主轴准停装置或主轴定向装置。如图 2-31 所示，在自动换刀的数控镗铣加工中心上，切削转矩通常是通过主轴上的端面键和刀柄上的键槽来传递的，这就要求主轴具有准确轴向定位功能。在加工精密的坐标孔时，由于每次都能在主轴的固定圆周位置换刀，故能保证刀尖与主轴相对位置的一致性，从而提高孔径的正确性。如图 2-32 所示，在加工阶梯孔或精镗孔后退刀，为了避免对已加工表面质量的影响，主轴必须先让刀，后退刀。所以刀具必须具有准停功能。

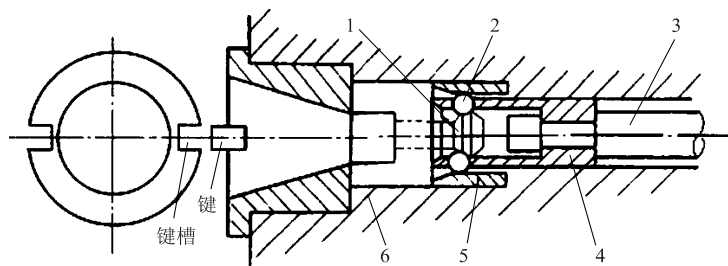


图 2-31 主轴头部定位夹紧示意图

1—刀柄拉钉；2—钢球；3—主轴拉杆；
4、5—套筒；6—主轴

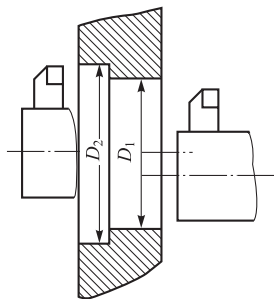


图 2-32 主轴准停背镗孔示意图

通常主轴准停机构分为机械控制式与电气控制式两种。机械控制方式采用机械凸轮机构或光电盘方式进行粗定位，然后由一个液动或气动的定位销插入主轴上的销孔或销槽实现精确定位，完成换刀后定位销退出主轴才开始旋转。采用这种传统方法定位，结构复杂，在早期数控机床上使用较多。

图 2-33 为典型的端面螺旋凸轮准停装置。在主轴 1 上固定有一个定位滚子 2，主轴上空套有一个双向端面凸轮 3，该凸轮和液压缸 5 中活塞杆 4 相连接，当活塞带动凸轮 3 向下

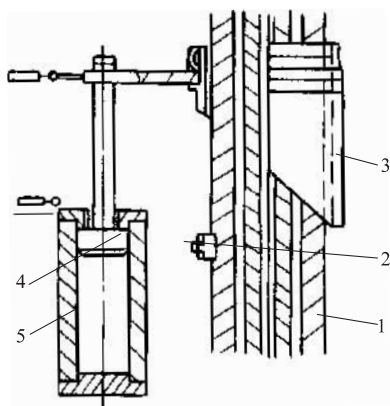


图 2-33 机械式凸轮准停装置

1—主轴；2—定位滚子；3—凸轮；

4—活塞杆；5—液压缸

移动时（不转动），通过拨动定位滚子 2 并带动主轴转动，当定位销落入端面凸轮的 V 形槽内，便完成了主轴准停。因为是双向端面凸轮，所以能从两个方向拨动主轴转动以实现准停。这种双向端面凸轮准停机构，动作迅速可靠，但是凸轮制造较复杂。

目前大多数数控机床采用电气方式定位。电气准停有三种方式，即磁传感器型、编码器型以及数控系统控制完成的主轴准停。

（1）磁传感器准停。

如 YASKAWA 主轴驱动加上可选定位件（OrientationCard）后可具有磁传感器主轴准停控制功能。磁传感器主轴准停控制由主轴驱动装置自身完成。

当执行 M19 时，数控系统只需发出主轴启动命令 ORT 即可。主轴驱动完成准停后会向数控装置输出完成信号 ORE，然后数控系统再进行下面的工作，其基本结构如图 2-34 所示。

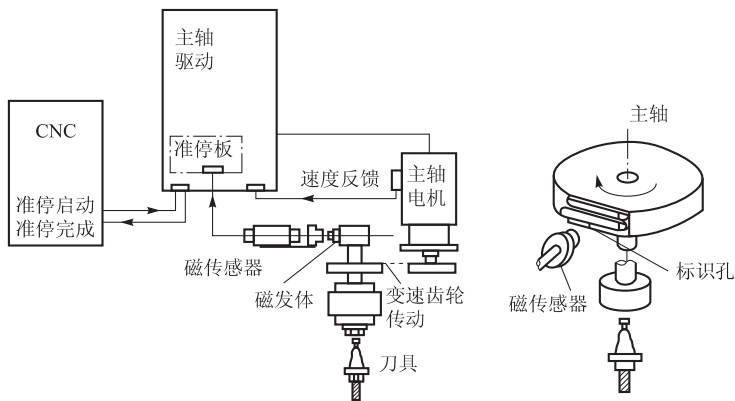


图 2-34 磁传感器主轴准停控制基本结构

由于采用了传感器，故应避免产生磁场的元件（如电磁线圈、电磁阀等）与磁发体和磁传感器安装在一起。采用磁传感器准停步骤如下。

当主轴转动或停止时，接收到数控装置发来的准停开关信号 ORT，主轴立即加速或减速至某一准停速度（可在主轴驱动装置中设定）。主轴到达准停速度且准停位置时（即磁发体与磁传感器对准），主轴立即减速至某一爬行速度（可在主轴驱动装置中设定）。当磁传感器信号出现时，主轴驱动立即进入磁传感器的作为反馈元件的位置闭环控制，目标位置为准停位置。准停完成后，主轴驱动装置输出准停完成信号 ORE 给数控装置，从而可进行自

动换刀（ATC）或其他动作。磁发体与磁传感器在主轴上的位置如图 2 - 35 所示，准停控制时序如图 2 - 35 所示。

如图 2 - 36 所示为 JCS - 018 A 主轴电气式装置。在传动主轴的带轮 1 的端面上安装一个厚垫片 4，其上装有一个很小的磁体 3，随主轴一起旋转。在主轴箱的准停位置上装有磁力传感器 2。当发出准停指令后，主轴进入慢速状态，当磁体 3 与传感器 2 对准时，磁力传感器发出准停信号，该信号经过放大控制电动机准停在规定位置上。这种方法结构简单，准停可靠，动作迅速稳定，所以广泛使用。

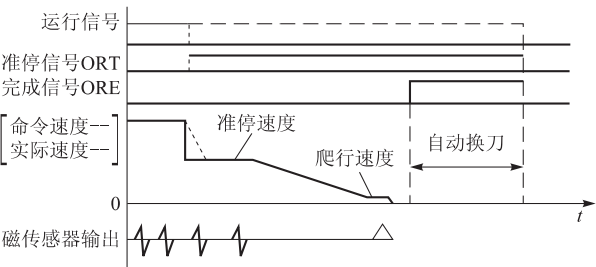


图 2 - 35 磁传感器准停控制时序

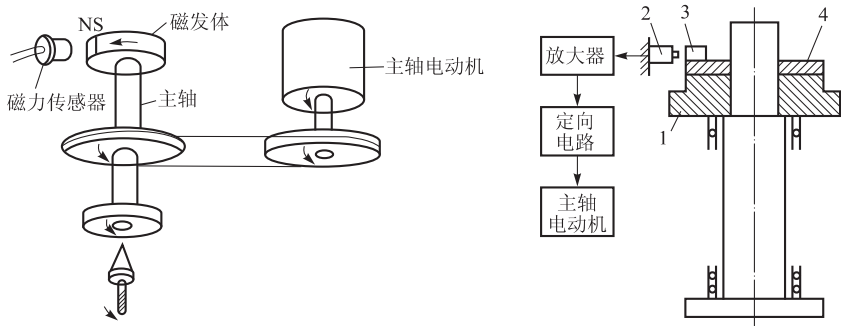


图 2 - 36 JCS - 018A 主轴电气式准停装置
1—主轴带轮；2—磁力传感器；3—磁体；4—垫片

（2）编码器型主轴准停。

如 YASKAWA 主轴驱动 VS - 626MT 配置选件板可具有编码器主轴准停功能。这种准停功能也是由主轴驱动完成的，CNC 只需发出 ORT 信号即可。主轴驱动完成准停后输出准停完成信号 ORE。编码器型准停的基本规格见表 2 - 1。

表 2 - 1 YASKAWA 编码器准停规格

位置检测方式	使用编码器 A, B, C 信号
准停位置	基本准停位置为编码器零位 C 脉冲达到处，准停位置偏移可在主轴驱动内部或由外部指定
重复准停精度	小于 $\pm 0.2^{\circ}$
误差修正转矩	额定转矩 / $\pm 0.1^{\circ}$ 误差

位置检测方式	使用编码器 A, B, C 信号
选件板	HPAC - C346
编码器型号	PC - 1024ZLH

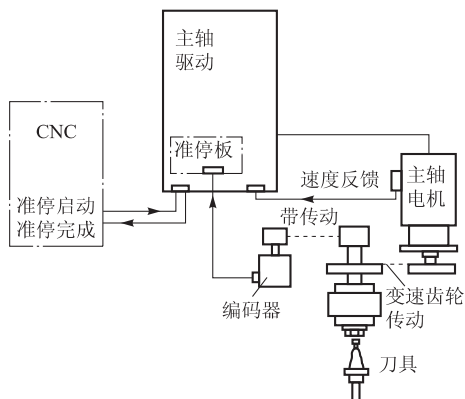


图 2-37 编码器主轴准停控制结构图

图 2-37 所示为编码器主轴准停控制结构图。这种主轴准停方式可采用主轴电动机内部安装的编码器信号（来自于主轴驱动装置），也可以在主轴上直接安装另外一个编码器。采用前一种方式要注意传动链对主轴准停精度的影响。主轴驱动装置内部可自动转换状态，使主轴驱动处于速度控制或位置控制状态。准停角度可由外部开关量信号（12 位）设定，这一点与磁传感器准停不同。磁传感器准停的角度无法随意设定，要调整准停位置，只有调整磁发体与磁传感器的相对位置，其控制步骤与传感器类似。

另外需要说明的是，无论采用何种准停方式（特别是对磁传感器准停方式），当需在主轴上安装元件时应注意动平衡问题。因为数控机床精度很高，转速也很高，因此对动平衡要求很严格。一般对中速以下的主轴来说，有一点儿不平衡还不至于有太大的问题。但对高速主轴而言，这一不平衡量会引起主轴振动。为适应主轴高速化的需要，国外已开发出整环式磁传感器主轴准停装置，因其磁发体采用整环形式的，故动平衡较好。

（3）数控系统准停。

这种准停控制方式的准停功能是由数控系统完成的。采用这种控制方式需注意以下问题。

① 数控系统必须具有主轴闭环控制功能。为避免冲击，主轴驱动通常都具有软启动功能，但这会对主轴位置闭环控制产生不良影响。此时若位置增益过低则准停精度和刚度（克服外界扰动的能力）不能满足要求，而位置增益过高则会产生严重的定位振荡现象。因此必须使主轴进入伺服状态，此时其特性与进给系统伺服系统相近，才可进行位置控制。

② 当采用电动机轴端编码器将信号反馈给数控装置，这时主轴传动链精度会对准停精度产生影响。

数控系统控制主轴准停的原理与进给位置控制的原理非常相似，如图 2-38 所示。

采用数控系统控制主轴准停时，角度指定由数控系统内部设定，因此准停角度可更方便地设定。

数控系统准停步骤：数控系统执行 M19 或 M19 S ~ 时，首先将 M19 送至可编程控制器，

可编程控制器经译码送出控制信号,使主轴驱动进入伺服状态,同时数控系统控制主轴电动机降速并寻找零位脉冲C,然后进入位置闭环控制状态。如执行M19而无S~指令,则主轴定位位于相对于零位脉冲C的某一默认位置(可由数控系统设定)。如执行

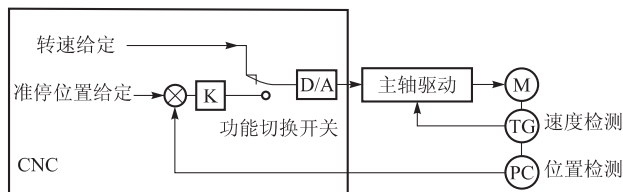


图 2-38 数控系统控制主轴准停的原理图

M19 S~,则主轴定位于指令位置,也就是相对零位脉冲S~的角度位置。

例如: M03S1000 主轴以 1 000 r/min 正转

M19 主轴准停于默认位置

M19S100 主轴准停转至 100°处

S1000 主轴再次以 1 000 r/min 正转

M19S200 主轴准停至 200°处

2.4.2 主轴准停装置

如图 2-39 所示为 THK6380 机床主轴准停装置原理图。

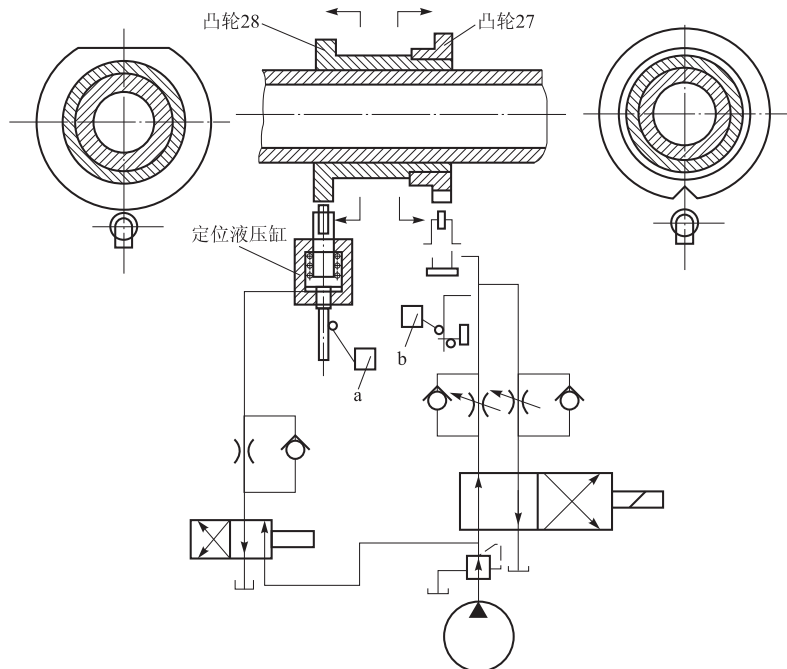


图 2-39 主轴准停装置原理图

其工作过程：机床数控系统发出准停指令时，电器系统自动调整主轴至最低转速，约 $0.2\text{ s} \sim 0.6\text{ s}$ 后定位凸轮 28 的定位器液压缸与压力油接通，活塞压缩弹簧并使滚子与定位凸轮 28 的外圆接触，当主轴旋转使滚子落入定位凸轮 28 的直线部分时，由于活塞杆的移动，与其相连的挡块使微动开关 a 动作，通过控制回路的作用，一方面使主轴传动的各电磁离合器都脱开而使主轴以惯性慢慢转动，并且断开定位凸轮 27 的定位器液压缸的压力油，在弹簧力作用下，活塞杆带动滚子退回。另一方面，隔 $0.2\text{ s} \sim 0.5\text{ s}$ 后，定位凸轮 27 的定位器液压缸下腔接通压力油，活塞杆带着滚子移动，使滚子与定位凸轮 27 的外圆接触。当主轴以惯性转动，使滚子落入定位凸轮 27 上的 V 形槽内时，即将主轴定位，同时微动开关 b 动作，发出主轴准停完毕信号。当刀具连同刀夹装入主轴并使主轴重新转动时，先发出信号控制换向阀使凸轮 27 的油路变换，将定位器滚子从定位凸轮 27 的 V 形槽中退出，同时使微动开关动作，发出主轴准停定位器释放信号。

如图 2-40 所示为加工中心主轴的准停、夹紧机构图，其工作过程为：交流调速电动机 11 通过带轮 10 和多联 V 带 9 带动主轴旋转，当主轴需要停车换刀时，发出降速信号，主轴箱自动改变传动路线，使主轴换到最低转速运转。在时间继电器延时数秒后，开始接通无触点开关。在凸轮上的感应片对准无触点开关时，发出准停信号，立即切断主轴电机电源，脱开与主轴的传动联系，以排除传动系统中大部分回转零件的惯性对主轴准停的影响，使主轴作低速惯性空转。位于图中带轮 5 左侧的永久磁铁 4 对准磁传感器 3 时，主轴准确停止，同时限位开关发出信号，表示已完成。

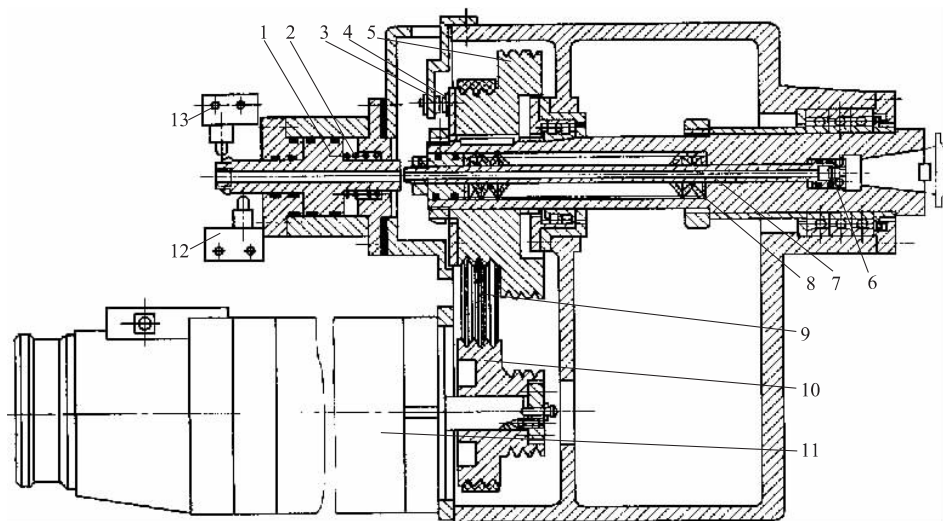


图 2-40 加工中心主轴的准停、夹紧机构

- 1—活塞；2—弹簧；3—磁传感器；4—永久磁铁；5—带轮；6—钢球；
7—拉杆；8—碟形弹簧；9—V 带；10—带轮；11—电动机；12、13—弹簧限位开关

2.4.3 主轴的同步运行功能

1. 脉冲编码器与同步运转的功能

数控机床的进给系统与普通机床的进给系统有本质的区别，数控机床没有传统的进给箱、溜板箱和挂轮架，而是直接用伺服电机通过滚珠丝杠来驱动溜板和刀架实现进给运动，因而进给系统的结构大为简化。数控机床上能加工各种螺纹，这是因为安装了与主轴同步运转的脉冲编码器，以便发出检测脉冲信号，使主轴电机的旋转与切削进给同步，从而实现螺纹的切削。

2. 主轴脉冲编码器的安装方式与作用

(1) 主轴脉冲编码器的安装方式。

一种是主轴脉冲编码器可通过一对齿轮或同步齿形带与主轴联系起来，由于主轴要求与编码器同步旋转，所以此连接必须做到无间隙。如图2-41所示MJ-50型数控车床主轴箱结构简图中，与主轴同轴的同步带16，通过同步带2和同步带轮3把主轴的旋转与脉冲编码器4联系起来。另一种方法是通过中间轴上的齿轮1:1地同步传动。

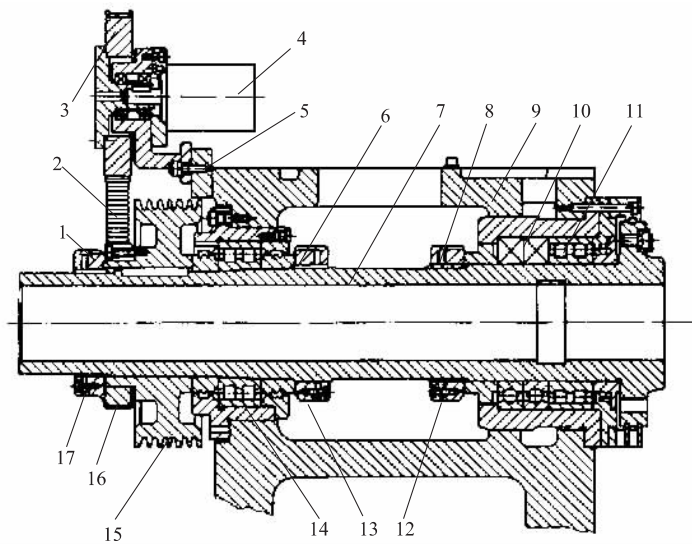


图2-41 MJ-50型数控车床主轴箱结构简图

- 1、6、8—螺母；2—同步带；3、16—同步带轮；4—脉冲编码器；
5、12、13、17—螺钉；7—主轴；9—主轴箱体；
10—角接触球轴承；11、14—滚子轴承；15—带轮

(2) 主轴脉冲编码器的作用。

在主轴与进给轴关联控制中都要使用脉冲编码器，它是精密数字控制与伺服控制设备中常用的角位移数字化检测器件，具有精度高、结构简单、工作可靠等优点。

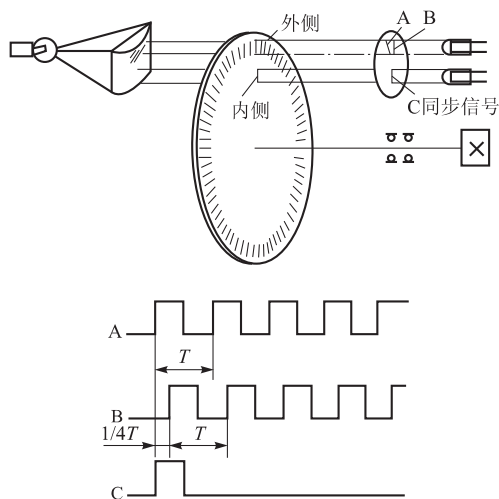


图 2-42 增量式编码器输出的
A、B 信号和零位 C 信号

增量式编码器一般可输出两个相位相差 90° 的 A、B 信号和一个零位 C 信号，如图 2-42 所示。其中 A、B 信号既可以用来计算角位移的大小，同时利用它们相位超前或滞后的相对关系还可以辨别旋转方向，例如 A 信号超前 B 信号表示正转的话，那么，B 信号超前 A 信号就表示反转。

脉冲编码器中的透光盘内圈的一条刻线与光挡上条纹 C 重合时输出的脉冲数为同步（起步，又称零位）脉冲，C 信号是每转一周发出一个脉冲，可以当作一周的零位信号，为 A 信号或 B 信号提供了计数的基准。例如，加工螺纹时可利用这个零位脉冲作为同步信号。

3. 主轴转动与进给运动联系的同步运行

数控机床主轴的转动与进给运动之间，没有机械方面的直接联系，在数控车床上加工圆柱螺纹时，要求主轴的转速与刀具的轴向进给保持一定的协调关系，无论该螺纹是等距螺纹还是变距螺纹都是如此。为此，通常在主轴上安装脉冲编码器来检测主轴的转角、相位、零位等信号。

在主轴旋转过程中，与其相连的脉冲编码器不断发出脉冲（由 AB 相检测到的脉冲）送给数控装置，控制插补速度。根据插补计算结果，控制进给坐标轴伺服系统，使进给量与主轴转速保持所需的比例关系，实现主轴转动与进给运动相联系的同步运行，从而车出所需的螺纹。

通过改变主轴的旋转方向可以加工出左螺纹或右螺纹，而主轴方向是通过脉冲编码器发出正交的 A 相和 B 相脉冲信号相位的先后顺序判别出来的。

2.5 主轴润滑与密封

2.5.1 主轴润滑

为了保证主轴有良好的润滑，减少摩擦发热，同时又能把主轴部件热量带走，通常采用循环润滑系统。用液压泵供油强力润滑，在油箱中使用油温控制器控制油液温度。近年来一部分数控机床的主轴轴承采用高级油脂封放式润滑，每加一次油脂可以使用 7~10 年，简化了结构，降低了成本且维护保养简单，但需防止润滑油和油脂混合，通常采用迷宫式密封方式。为了适应主轴转速向更高速化发展的需要，新的润滑冷却方式相继开发出来。这些新的润滑冷却方式不但要减少轴承温升，还要减少轴承内外圈的温差，以保证主轴的热变形小。

常见主轴润滑方式有以下几种。

(1) 喷注润滑方式。

如图2-43所示。它用较大流量的恒温油（每个轴承（3~4）L/min）喷注到主轴轴承，以达到冷却润滑的目的。回油则不是自然回流，而是用两台排油液压泵强制排油。同时，采用专用高精度大容量恒温油箱，油温变动控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 油雾润滑方式。

油雾润滑是利用经过净化处理的高压气体将润滑油雾后，并经管道喷送到需润滑的部位。该方式由于雾状油液吸热性好，又无油液搅拌作用，所以能以较少油量获得较充分的润滑，常用于高速主轴轴承的润滑。缺点是油雾容易被吹出，污染环境。油雾润滑系统通常由压缩空气的分水过滤器，电磁阀、调压器进入雾化器后，送往喷嘴喷出润滑。

(3) 油气润滑方式。

这种润滑方式近似于油雾润滑方式，所不同的是，油气润滑是定时定量地把油雾送进轴承空隙中，这样既实现了油雾润滑，又不至于油雾太多而污染周围空气；而油雾润滑则是连续供给油雾。

如图2-44所示为油气润滑原理图。根据轴承供油量的要求，定时器的循环时间可从1~99 min定时，二位二通气阀每定时开通一次，压缩空气进入注油器，把少量油带入混合室，经节流阀的压缩空气，经混合室，把油带进塑料管道内，油液沿管道壁被风吹进轴承内，此时，油呈小油滴状。

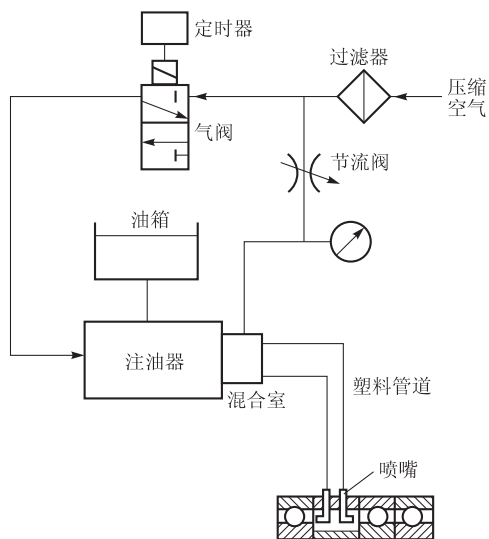


图 2-44 油气润滑原理图

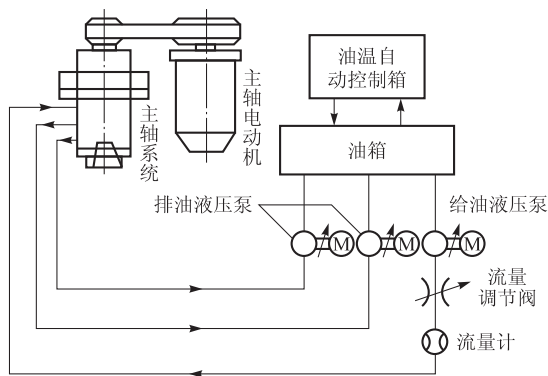


图 2-43 喷注润滑

2.5.2 主轴密封

在密封件中，被密封的介质往往是以穿漏、渗透或扩散的形式越界泄漏到密封连接处的彼侧。造成泄漏的基本原因是流体从密封面上的间隙中溢出，或是由于密封部件内外两侧密封介质的压力差或浓度差，致使流体向压力或浓度低的一侧流动。如图2-45所示为一卧式加工中心主轴前支承的密封结构。

该卧式加工中心主轴前支承处采用双层小

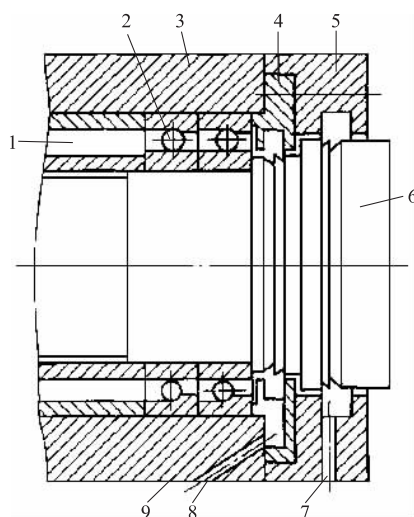


图 2-45 卧式加工中心主轴前支承的密封结构

- 1—套筒；2—轴承；3—套筒；
4、5—法兰盘；6—主轴；7—泄漏孔；
8—回油斜孔；9—泄油孔

主轴转动的离心力把油沿斜面甩到端盖 1 的空腔内，油液流回箱内；图 2-46 (c) 是迷宫式密封结构，在切屑多、灰尘大的工作环境下可获得可靠的密封效果，这种结构适用油脂或油液润滑的密封。非接触式的油液密封时，为了防漏，保证回油能尽快排掉，必须要保证回油孔的畅通。

接触式密封主要有油毡圈和耐油橡胶密封圈密封，如图 2-47 所示。

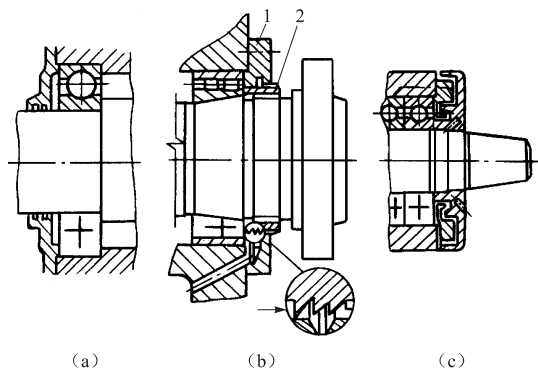


图 2-46 非接触式密封
1—端盖；2—螺母

间隙密封装置。主轴前端车出两组锯齿形护油槽，在法兰盘 4 和 5 上开沟槽及泄漏孔，当喷入轴承 2 内的油液流出后被法兰盘 4 内壁挡住，并经其下部的泄油孔 9 和套筒 3 上的回油斜孔 8 流回油箱，少量油液沿主轴 6 流出时，主轴护油槽在离心力的作用下被甩至法兰盘 4 的沟槽内，经回油斜孔 8 流回油箱，达到防止润滑介质泄漏的目的。当外部切削液、切屑及灰尘等沿主轴 6 与法兰盘 5 之间的间隙进入时，经法兰盘 5 的沟槽由泄漏孔 7 排出，达到了主轴端部密封的目的。要使间隙密封结构能在一定的压力和温度范围内具有良好的密封防漏性能，必须保证法兰盘 4 和 5 与主轴及轴承端面的配合间隙。

主轴的密封有接触式和非接触式密封。如图 2-46 所示是几种非接触密封的形式。

图 2-46 (a) 是利用轴承盖与轴的间隙密封，轴承盖的孔内开槽是为了提高密封效果，这种密封用在工作环境比较清洁的油脂润滑处；图 2-46 (b) 是在螺母的外圆上开锯齿形环槽，当油向外流时，靠主

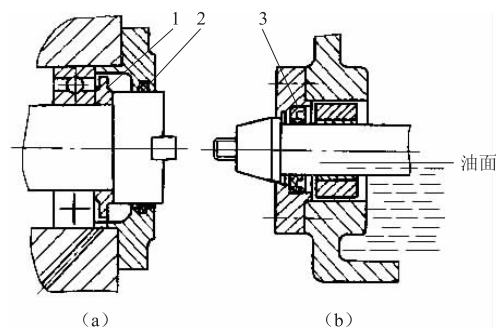


图 2-47 接触式密封

- 1—甩油环；2—油毡圈；3—耐油橡胶密封圈

2.6 电 主 轴

自 20 世纪 80 年代以来,数控机床、加工中心主轴向高速化发展。高速数控机床主传动的机械结构已得到极大的简化,取消了带传动和齿轮传动,机床主轴由内装式电动机直接驱动,从而把机床主传动链的长度缩短为零,实现了机床主运动的“零传动”,这种结构称为电主轴。它具有结构紧凑、机械效率高、可获得极高的回转速度、振动小等优点,因而在现代数控机床中获得了愈来愈广泛的应用。在国外,电主轴已成为一种机电一体化的高科技产品很高的专业工厂生产,如瑞士的 FISCHER 公司、德国的 GMN 公司、美国的 PRECISE 公司、意大利的 GAMFIOR 公司、日本的 NSK 公司和 KOYO 公司、瑞典的 SKF 公司等。

1. 电主轴的结构

如图 2-48 所示,电主轴由无外壳电机、主轴、轴承、主轴单元壳体、驱动模块和冷却装置等组成。主轴由前后两套滚珠轴承来支承,电动机的转子用压配合的方法安装在机床主轴上,处于前后轴承之间,由压配合产生的摩擦力来实现大转矩的传递。电机的定子通过冷却套安装于主轴单元的壳体中。这样,电动机的转子就是机床的主轴,电主轴的箱体就是电动机座,成为机电一体化的一种新型主轴系统。

主轴的变速由主轴驱动模块控制,而主轴单元装置限制。在主轴的后端装有测速、测角位移传感器,前端的内锥孔和端面用于安装刀具。

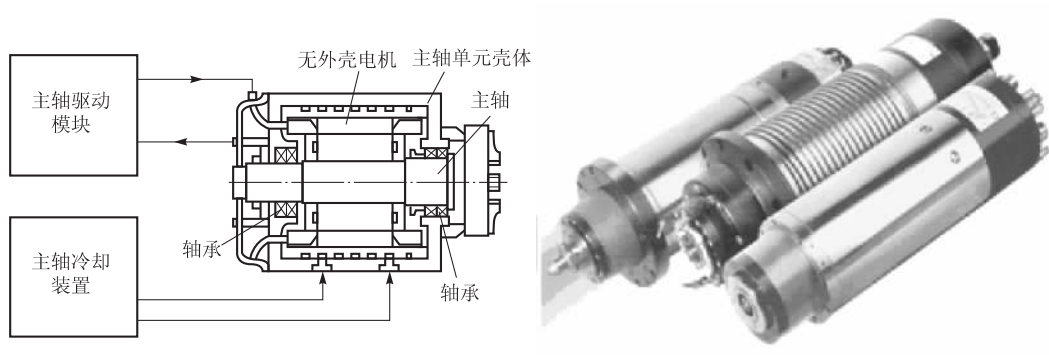


图 2-48 电主轴的结构

2. 电主轴的轴承

轴承是决定主轴寿命和承载能力的关键部件,其性能对电主轴的使用功能极为重要。目前电主轴采用的轴承主要有陶压轴承和磁悬浮轴承。

陶瓷球轴承已在加工中心机床上得到广泛应用,其轴承的滚动体是用陶瓷材料制成,而内、外圈仍用轴承钢制造。陶瓷材料为 Si_3N_4 ,其优点是重量轻,热膨胀率低,弹性模量大(一般轴承的 1.5 倍)。采用陶瓷滚动体,可大大减少轴承离心力和惯性滑移,有利于提高主轴转速。如德国 GMN 公司和瑞士 STEP-TEC 公司在加工中心和数控铣床上已经采用了陶瓷球轴承作电主轴。

磁悬浮轴承依靠多对在圆周上互为 180° 的磁极产生径向吸力(或斥力),而将主轴悬浮在空气中,使轴颈与轴承不接触左右。当承受载荷后,主轴空间位置会产生微小变化,控制装置根据位置传感器检测出的主轴位置变化值,改变相应磁极的吸力,以使主轴迅速恢复到原来的位置,从而保证主轴始终绕其惯性轴作高速回转,因此它的高速性能好、精度高,但由于价格昂贵,而较少应用。

3. 电主轴的冷却润滑技术

由于电主轴将电机集成于主轴单元中,且其转速很高,运转时会产生大量热量,引起电主轴温升,使电主轴的热特性差,从而影响电主轴的正常工作。因此,必须采取一定措施控制电主轴的温度,使其恒定在一定值内。

(1) 电动机内装式主轴的冷却。

一般采取强制循环主轴的定子及主轴轴承进行冷却,即将经过油冷却装置的冷却油强制性地在主轴定子外和主轴轴承外循环,带走主轴高速旋转产生的发热。这也是近来高速加工中心主轴发展的一种趋势。如图 2-49 所示为冷却油流路线图。

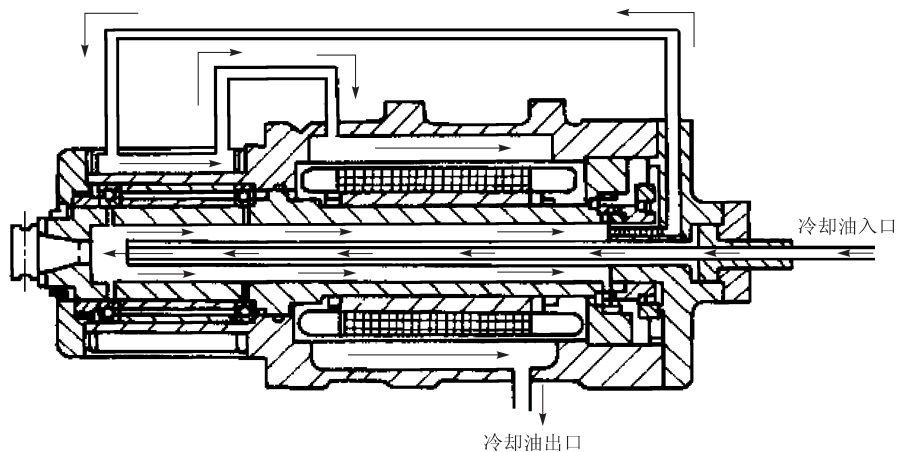


图 2-49 电动机内装式主轴冷却油流路线图

(2) 电主轴的润滑方式。

电主轴的润滑方式主要有油脂润滑、油雾润滑和油气润滑等。油脂润滑结构简单,但达

不到很高的转速；油雾润滑效果较好，目前应用也最为广泛，它可以适应较高的转速，但它对环境有一定的影响；油气润滑效果最好，可适应更高的转速，对环境无污染，但油气润滑装置价格较高。油雾、油气润滑采用的油品一般为 32 号汽轮机油。

此外，还有突入滚道式润滑方式等。

突入滚道式润滑方式：通常当内径为 100 mm 的轴承以 200 r/min 的速度运转时，主轴的线速度可以达到 100 m/s 以上，轴承四周的空气也伴随流动，速度可达 50 m/s。要使润滑油突破这层高速旋转气流比较困难，但采用突入滚道式润滑方式则可以很可靠地将油送入轴承滚道处。如图 2-50 所示为适应该要求而设计的特殊轴承。润滑油的

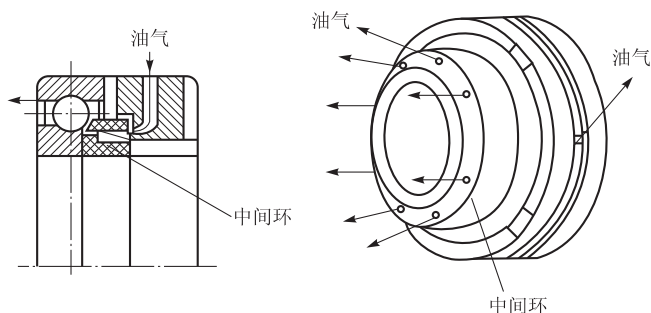


图 2-50 突入滚道式润滑用特种轴承

进口口在内滚道附近，利用高速轴承的泵效应，把润滑油吸入滚道。若进油口较高，则泵效应差，当进油接近外滚道时则成为排放口了，油液将不能进入轴承内部。

4. 电主轴的驱动

当前，电主轴的电动机均采用交流异步感应电动机，由于是用在高速加工机床上，启动时要从静止迅速升至每分钟数转乃至数十万转，启动转矩大，因而启动电流要超出普通电机额定电流 5~7 倍。其驱动方式有变频器驱动和矢量控制驱动器驱动两种。变频器的驱动控制特性为恒转矩驱动，输出功率与转矩成正比，如图 2-51 所示为恒转矩主轴。最新的变频器采用先进的晶体管技术（ABB 公司生产的 SAMIGS 系列变频器），可实现主轴的无级变速。矢量控制驱动器的驱动控制为：在低速端为恒转矩驱动，在中、高速端为恒功率驱动，如图 2-52 所示为恒功率主轴。

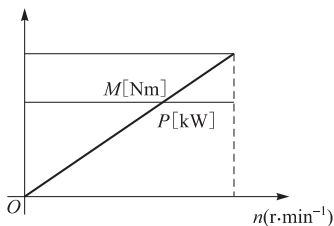


图 2-51 恒转矩主轴

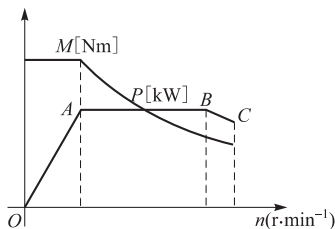


图 2-52 恒功率主轴

思考与练习题

1. 数控机床对主传动系统的要求是什么？
2. 数控机床主传动系统的特点是什么？
3. 数控机床的主轴的传动方式有哪些？
4. 简述数控机床主传动系统的类型有哪些？
5. 数控机床上使用的同步齿形带有何特点？
6. 数控机床的主轴部件主要包括哪些？常用主轴部件的结构形式是什么？
7. 分析刀具自动卡紧机构的工作过程。
8. 数控机床主轴轴承类型有哪些？
9. 数控机床主轴轴承的配置形式有哪些？
10. 简述滚动轴承的预紧方法。
11. 数控机床中为什么使用主轴准停功能？常用的主轴准停机构有哪些？
12. 简述主轴脉冲编码器的安装方式与作用。
13. 为什么数控机床主轴内配置切屑清除装置？
14. 主轴润滑方式有哪些？
15. 简述数控机床的电主轴。

第 3 章

数控机床的进给传动系统

数控机床的进给传动系统常用伺服进给系统来工作，伺服进给系统的作用是根据数控系统传来的指令信息，进给放大以后控制执行部件的运动，不仅控制进给运动的速度，同时还要精确控制刀具相对于工件的移动位置和轨迹。因此，数控机床进给系统，尤其是轮廓控制系统，必须对进给运动的位置和运动的速度两个方面同时实现自动控制。

一个典型的数控机床闭环控制的进给系统，通常由位置比较、放大元件、驱动单元、机械传动装置和检测反馈元件等部分组成，而其中的机械传动装置是控制环中的一个重要环节。这里所说的机械传动装置，是指将驱动源（即电动机）的旋转运动变为工作台或刀架直线运动的整个机械传动链，包括齿轮传动副、滚珠丝杠螺母副、减速装置和蜗杆蜗轮等中间传动机构（如图 3-1 所示）。由于滚珠丝杠、伺服电机及其控制单元性能的提高，很多数控机床的进给系统中已去掉减速机构而直接用伺服电机与滚珠丝杠联结，因而整个系统结构简单，减少了产生误差的环节；同时，由于转动惯量减小，使伺服特性亦有所改善。在整个进给系统中，除了上述部件外，还有一个重要的环节就是导轨。虽然从表面上看导轨似乎与进给系统不十分密切，实际上运动摩擦力及负载这两个参数在进给系统中占有重要地位。因此导轨的性能对进给系统的影响是不容忽视的。

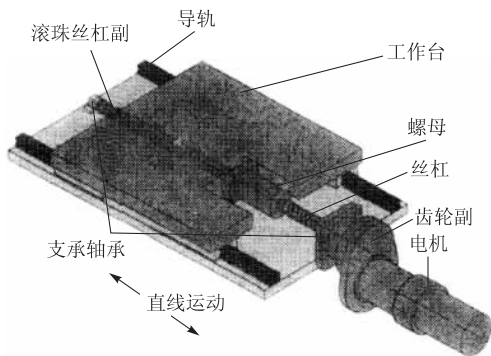


图 3-1 数控机床进给系统机械部分的基本组成

3.1 对数控机床进给传动系统的要求

数控机床进给传动系统承担了数控机床各直线坐标轴、回转坐标轴的定位和切削进给，进给系统的传动精度、灵敏度和稳定性直接影响被加工工件的最后轮廓精度和加工精度。为了

保证数控机床进给传动系统的定位精度和动态性能，对数控机床进给传动系统的要求主要有如下几个方面。

（1）低惯量。

进给传动系统由于经常需启动、停止、变速或反向运动，若机械传动装置惯量大，就会增大负载并使系统动态性能变差。因此在满足强度与刚度的前提下，应尽可能减小运动部件的自重及各传动元件的直径和自重。

（2）低摩擦阻力。

进给传动系统要求运动平稳、定位准确、快速响应特性好，必须减小运动件的摩擦阻力和动摩擦系数与静摩擦系数之差。所以导轨必须采用具有较小摩擦系数和高耐磨性的滚动导轨、静压导轨和滑动导轨等。此外进给传动系统还普遍采用了滚珠丝杠副。

（3）高刚度。

数控机床进给传动系统的高刚度主要取决于滚珠丝杠副（直线运动）或蜗轮蜗杆副（回转运动）及其支承部件的刚度。刚度不足和摩擦阻力会导致工作台产生爬行现象及造成反向死区，影响传动准确性。缩短传动链，合理选择丝杠尺寸及对滚珠丝杠副和支承部件的预紧是提高传动刚度的有效途径。

（4）高谐振。

为了提高进给的抗振性，应使机械构件具有较高的固有频率和合适的阻尼，一般要求进给传动系统的固有频率应高于伺服驱动系统的固有频率2~3倍。

（5）无传动间隙。

为了提高位移精度，减小传动误差，对采用的各种机械部件首先要保证它们的加工精度，其次要尽量消除各种间隙，因为机械间隙是造成进给传动系统反向死区的另一主要原因。因此对传动链的各个环节，包括联轴器、齿轮传动副及其支承部件均应采用消除间隙的各种结构措施。但是采用预紧等各种措施后仍可能留有微量间隙，所以在进给传动系统反向运动时仍需由数控装置发出脉冲指令进行自动补偿。

3.2 联轴器

联轴器是用来连接进给机构的两根轴，使之一起回转与传递扭矩和运动的一种装置。机器运转时，被连接的两轴不能分离，只有停车后，将联轴器拆开，两轴才能脱开。

目前联轴器的类型繁多，有液压式、电磁式和机械式。其中机械式联轴器的应用最为广泛。它借助机械构件相互间的机械作用来传递扭矩，大致可作如下分类：

机械式	刚性	固定式——套筒联轴器、凸缘联轴器及夹壳联轴器等
		可移式——齿轮联轴器、十字滑块联轴器及万向联轴器等
	弹性	金属弹性件联轴器——簧片联轴器、膜片联轴器及波形管联轴器等
		非金属弹性联轴器——轮胎式联轴器、整圈橡胶联轴器及橡胶块联轴器等

下面介绍几种数控机床常用的联轴器。

1. 套筒联轴器

如图 3-2 所示, 套筒联轴器由连接两轴轴端的套筒和联接套筒与轴的联接件(键或销钉)所组成, 一般当轴端直径 $d \leq 80$ mm 时, 套筒用 35 或 45 钢制造; $d > 80$ mm 时, 可用强度较高的铸铁制造。

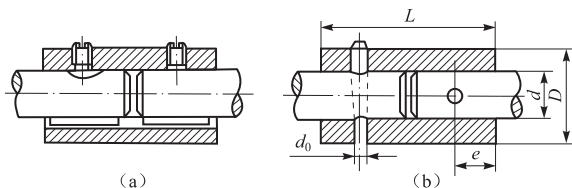


图 3-2 套筒联轴器
(a) 键连接; (b) 销钉连接

套筒联轴器各部分尺寸间的关系如下:

套筒长 $L \approx 3d$;

套筒外径 $D \approx 1.5d$;

销钉直径 $d_0 = (0.3 \sim 0.25)d$ (对小联轴器取 0.3; 对大联轴器取 0.25);

销钉中心到套筒端部的距离 $e \approx 0.75d$ 。

此种联轴器构造简单, 径向尺寸小, 但其装拆困难(轴需作轴向移动)且要求两轴严格对中, 不允许有径向及角度偏差, 因此使用上受到一定限制。

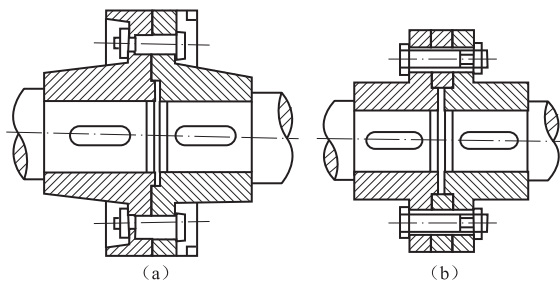


图 3-3 凸缘式联轴器

2. 凸缘式联轴器

如图 3-3 所示, 凸缘式联轴器是把两个带有凸缘的半联轴器分别与两轴连接, 然后用

螺栓把两个半联轴器连成一体，以传递运动和扭矩。

凸缘式联轴器有两种对中方法：一种是用一个半联轴器上的凸肩与另一个半联轴器上的凹槽相配合而对中（如图 3-3（a））；另一种则是共同与另一剖分环相配合而对中（如图 3-3（b））。前者在装拆时轴必须作轴向移动，后者则无此缺点。联接螺栓可以采用半精制的普通螺栓，此时螺栓杆与钉孔壁间存有间隙，扭矩靠半联轴器结合面间的摩擦力来传递（图 3-3（b））；也可采用铰制孔用螺栓，此时螺栓杆与钉孔为过渡配合，靠螺栓杆对受挤压与剪切来传递扭矩（图 3-3（a））。凸缘式联轴器可作成带防护边的（图 3-3（a））或不带防护边的（图 3-3（b））。

凸缘式联轴器的材料可用 HT250 或碳钢，重载时或圆周速度大于 30 m/s 时应用铸钢或锻钢。

凸缘式联轴器对于所联接的两轴的对中性要求相当高，当两轴间有位移与倾斜存在时，就在机件内引起附加载荷，使工作情况恶化，这是它的主要缺点。但由于其构造简单、成本低以及可传递较大扭矩，故当转速低、无冲击、轴的刚性大以及对中性较好时亦常采用。

3. 挠性联轴器

在大扭矩宽调速直流电机及传递扭矩较大的步进电机的传动机构中，与丝杠之间可采用直接连接的方式，这不仅可简化结构、减少噪声，而且对减少间隙、提高传动刚度也大有好处。

图 3-4 为采用锥形夹紧环（简称锥环）的消隙联轴器，可使动力传递没有反向间隙。螺钉 5 通过压圈 3 施加轴向力时，由于锥环之间的楔紧作用，内外环分别产生径向弹性变形，消除配合间隙，并产生接触压力以传递扭矩。为了能补偿同轴度及垂直度误差引起的憋劲现象，可采用图 3-5 所示的挠性联轴器。柔性片 4 分别用螺钉和球面垫圈与两边的联轴套 2 相连，通过柔性片传递扭矩。柔性片每片厚 0.25 mm，材料为不锈钢。两端的位置偏差由柔性片的变形抵消。

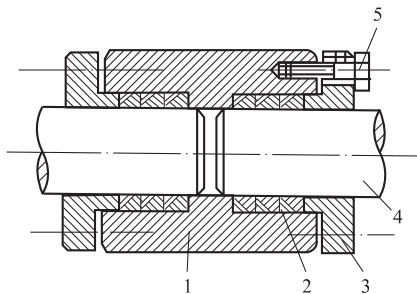


图 3-4 消隙联轴器

1—套筒；2—锥环；3—压圈；
4—轴；5—螺钉

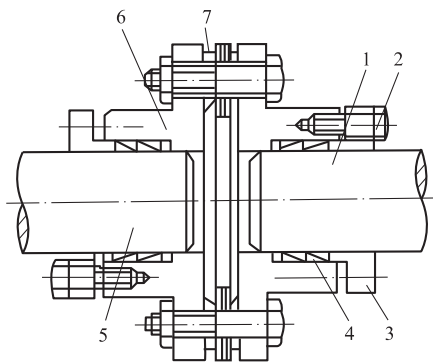


图 3-5 挠性联轴器

1—压圈；2—联轴套；3、5—球面垫圈；4—柔性片；6—锥环

这种联轴器传递功率大, 转速高, 使用寿命长, 能适应较大的相对位移, 能在受振动和冲击载荷等恶劣条件下连续工作, 安装、使用和维护方便、简单, 作用于系统中的负荷小、噪声小, 因而在数控机床的进给传动系统中应用广泛。

3.3 减速机构

3.3.1 齿轮传动装置

齿轮传动是应用非常广泛的一种机械传动, 各种机床的传动装置中几乎都有齿轮传动。在数控机床伺服进给系统中采用齿轮传动装置的目的有两个: 一是将高转速转矩的伺服电机(如步进电机、直流和交流伺服电机等)的输出改变为低转速大转矩的执行件的输入; 另一个是使滚珠丝杠和工作台的转动惯量在系统中占有较小的比重。此外, 对于开环系统还可以保证所要求的运动精度。

为了尽量减小齿侧间隙对数控机床加工精度的影响, 经常在结构上采取措施, 以减小或消除齿轮副的空行程误差。如采用双片齿轮错齿法、利用偏心套调整齿轮副中心距或采用轴向垫片调整法消除齿轮侧隙。

与采用同步齿形带相比, 在数控机床进给传动链中采用齿轮减速装置, 更易产生低频振荡, 因此减速机构中常配置阻尼器来改善动态性能。

3.3.2 同步齿形带

同步齿形带传动是一种新型的带传动。它利用齿形带的齿形与带轮的轮齿依次啮合传递运动和动力, 因而兼有带传动、齿轮传动及链传动的优点, 且无相对滑动, 平均传动比较准确, 传动精度高, 而且齿形带的强度高、厚度小、重量轻, 故可用于高速传动。齿形带无需特别张紧, 故作用在轴和轴承上的载荷小, 传动效率也高, 现已在数控机床上广泛应用。同步齿形带的主要参数与规格如下:

(1) 齿距。

齿距 p 为相邻两齿在节线上的距离。由于强力层在工作时长度不变, 所以强力层的中心线被规定为齿形带的节线(中性层), 并以节线的周长 L 作为齿形带的公称长度。

(2) 模数。

模数定义为 $m = p/\pi$, 是齿形带尺寸计算的一个主要依据。

(3) 其他参数。

齿形带的其他参数和尺寸与渐开线齿条基本相同。齿形带齿形的计算公式与渐开线齿条不同, 因为齿形带的节线在强力层上, 而不在齿高中部。齿形带的标注方法是: 模数 $\times$ 宽度

× 齿数, 即 $m \times b \times z$ 。

3.4 滚珠丝杠螺母副

为了提高进给系统的灵敏度、定位精度和防止爬行, 必须降低数控机床进给系统的摩擦并减少静、动摩擦系数之差。因此, 行程不太长的直线运动机构常用滚珠丝杠螺母副。它是直线运动与回转运动相互转换的新型传动装置。它可以消除反向间隙并施加预载, 有助于提高定位精度和刚度。

3.4.1 滚珠丝杠螺母副的工作原理与特点

1. 滚珠丝杠螺母副的工作原理

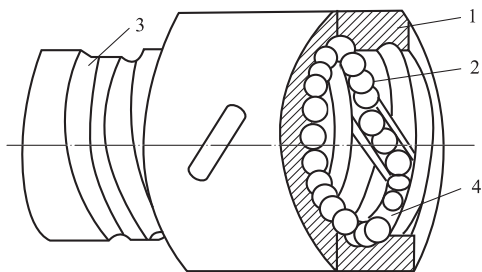


图 3-6 滚珠丝杠螺母副的结构原理

1—螺母; 2—滚珠; 3—丝杠; 4—回路管道

滚珠丝杠螺母副的结构原理如图 3-6 所示。在丝杠 3 和螺母 1 上都有半圆形的螺旋槽, 当它们套装在一起时便形成了滚珠的螺母滚道。螺母上有滚珠回路管道 4, 将几圈螺母滚道的两端连接起来, 构成封闭的循环滚道, 并在滚道内装满滚珠 2。当丝杠旋转时, 滚珠在滚道内既自转又沿滚道循环转动, 从而迫使螺母轴向移动。

2. 滚珠丝杠螺母副的特点

由于滚珠丝杠在传动时, 丝杠与螺母之间

基本上是滚动摩擦, 所以具有以下特点。

① 传动效率高, 磨损损失小。滚珠丝杠螺母副的传动效率 $\mu = 0.92 \sim 0.96$, 比常规螺母副提高 3~4 倍。因此, 功率消耗只相当于常规丝杠螺母副的 $1/4 \sim 1/3$ 。

② 给予适当预紧, 可消除丝杠和螺母的螺纹间隙, 反向时就可以消除空行程死区, 定位精度高, 刚度好。

③ 运动平稳, 无爬行现象, 传动精度高。

④ 有可逆性, 可以从旋转运动转换为直线运动, 也可以从直线运动转换为旋转运动, 即丝杠和螺母都可以作为主动件。

⑤ 磨损小, 使用寿命长。

⑥ 制造工艺复杂, 成本高。滚珠丝杠和螺母等元件的加工精度要求高, 表面粗糙也要求高, 故制造成本高。

⑦ 不能自锁。特别是对于垂直丝杠, 由于自重的作用, 下降时当传动切断后, 不能立

即停止运动，故常需添加制动装置。

3.4.2 滚珠丝杠螺母副的循环方式

常用的循环方式有两种：外循环和内循环。滚珠在循环过程中有时与丝杠脱离接触的称为外循环；始终与丝杠保持接触的称为内循环。滚珠每一个循环闭路称为列，每个滚珠循环闭路内所含导程数称为圈数。内循环滚珠丝杠副的每个螺母有 2 列、3 列、4 列、5 列等几种，每列只有一圈；外循环每列有 1.5 圈、2.5 圈和 3.5 圈等几种。

(1) 外循环。

外循环是滚珠在循环过程结束后通过螺母外表面的螺旋槽或插管返回丝杠螺母间重新进入循环。如图 3-7 所示，外循环滚珠丝杠螺母副按滚珠循环时的返回方式主要有端盖式、插管式和螺旋槽式。

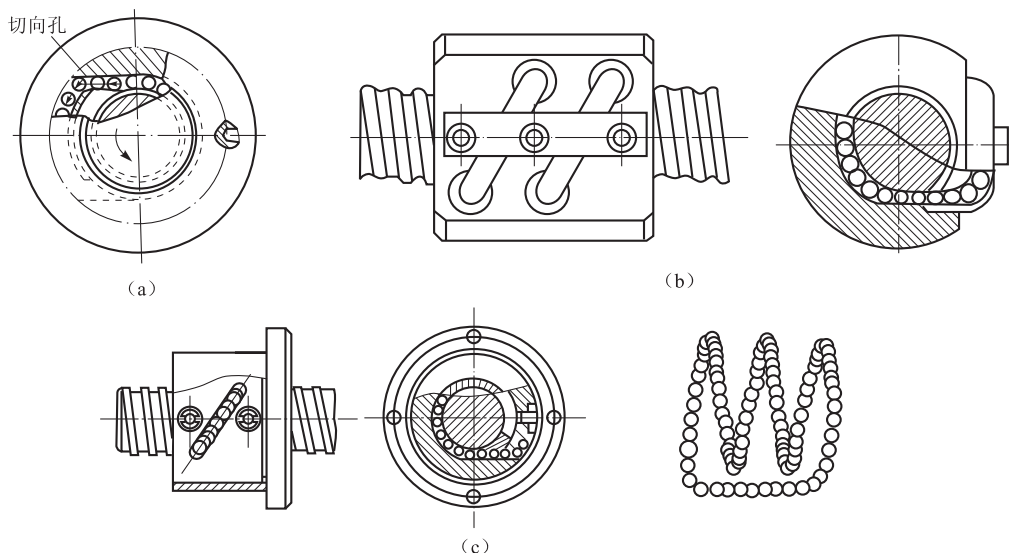


图 3-7 常用的外循环方式
(a) 端盖式；(b) 插管式；(c) 螺旋槽式

如图 3-7 (a) 所示是端盖式，在螺母上加工出一纵向孔，作为滚珠的回程通道，螺母两端的盖板上开有滚珠的回程口，滚珠由此进入回程管，形成循环。

如图 3-7 (b) 所示为插管式，它用弯管作为返回管道，这种结构工艺性好，但由于管道突出于螺母体外，径向尺寸较大。

如图 3-7 (c) 所示为螺旋槽式，它是在螺母外圆上铣出螺旋槽，槽的两端钻出通孔并与螺纹滚道相切，形成返回通道，这种结构比插管式结构径向尺寸小，但制造较复杂。

外循环滚珠丝杠外循环结构和制造工艺简单,使用较广泛。其缺点是滚道接缝处很难做得平滑,影响滚珠滚道的平稳性,甚至发生卡珠现象,噪声也较大。

(2) 内循环。

如图 3-8 所示为内循环滚珠丝杠。内循环均采用反向器实现滚珠循环,反向器有两种类型。

如图 3-8 (a) 所示为圆柱凸键反向器,它的圆柱部分嵌入螺母内,端部开有反向槽 2。反向槽靠圆柱外圆面及其上端的圆键 1 定位,以保证对准螺纹滚道方向。

如图 3-8 (b) 所示为扁圆镶块反向器,反向器为一般圆头平键形镶块,镶块嵌入螺母的切槽中,其端部开有反向槽 3,用镶块的外轮廓定位。两种反向器比较,后者尺寸较小,从而减小了螺母的径向尺寸及缩短了轴向尺寸。但这种反向器的外轮廓和螺母上的切槽尺寸精度要求较高。

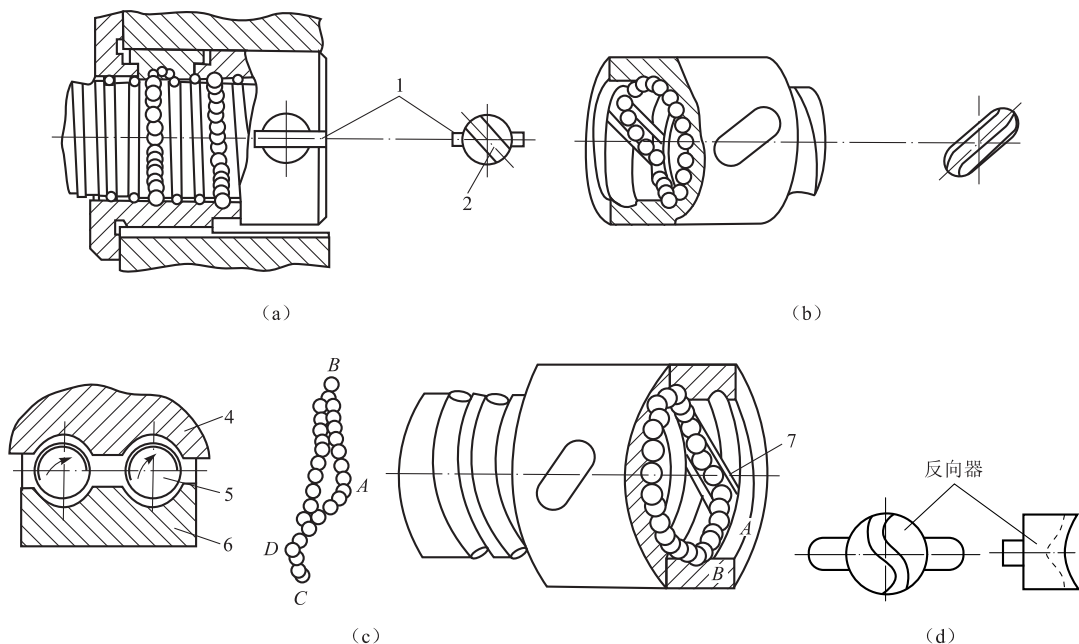


图 3-8 内循环滚珠丝杠

内循环滚珠丝杠的优点是径向尺寸紧凑,刚性好,因其返回滚道较短,故摩擦损失小。适用于高灵敏、高精度传动、不宜用于重载传动。其缺点是反向器加工困难。

3.4.3 螺旋滚道型面

螺旋滚道型面(即滚道法向截形)的形状有多种,常见的截形有单圆弧型面和双圆弧

型面两种。如图 3-9 所示为螺旋滚道型面的简图, 图中钢球与滚道表面在接触点处的公法线与螺纹轴线的垂线间的夹角称为接触角 α , 理想接触角 $\alpha = 45^\circ$ 。

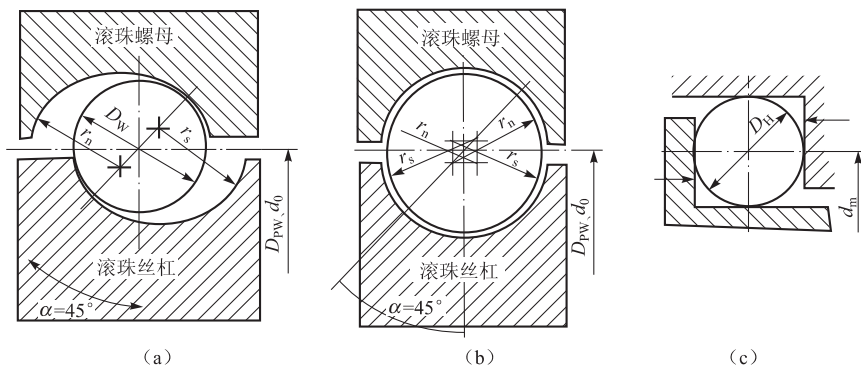


图 3-9 滚珠丝杠副螺旋滚道型面的形状

(a) 单圆弧; (b) 双圆弧; (c) 矩形滚道

(1) 单圆弧型面。

如图 3-9 (a) 所示, 通常滚道半径 r_n 稍大于滚珠半径 r_w , 通常 $2r_n = (1.04 \sim 1.1) D_w$ 。对于单圆弧型面的螺纹滚道, 接触角 α 是随轴向负荷 F 的大小而变化的。当 $F = 0$ 时, $\alpha = 0$; 承载后, 随着 F 的增大, α 增大。 α 的大小由接触变形的大小决定。当接触 α 增大后, 传动效率 E_d 、轴向刚度 R_c 以及承载能力随之增大。

(2) 双圆弧型面。

如图 3-9 (b) 所示, 滚珠与滚道只在内相切的两点接触, 接触角 α 不变。两圆弧交接处有一小空隙, 可容纳一些脏物, 这对滚珠的流动有利。

单圆弧型面, 接触角 α 是随负载的大小而变化的, 因而轴承刚度和承载能力也随之而变化, 应用较少。双圆弧型面, 接触角选定后是不变的, 应用较广。

(3) 矩形滚道型面。

如图 3-9 (c) 所示, 这种型面制造容易, 只能承受轴向载荷, 承载能力低, 可在要求不高的传动中应用。

3.4.4 滚珠丝杠螺母副间隙的消除

滚珠丝杠螺母副的间隙是轴向间隙。轴向间隙的数值是指丝杠和螺母无相对转动时, 丝杠和螺母之间的最大轴向窜动量, 除了结构本身所有的游隙之外, 还包括施加轴向载荷后丝杠产生弹性变形所造成的轴向窜动量。

为了保证滚珠丝杠传动精度和轴向刚度, 必须消除滚珠丝杠螺母副轴向间隙。除了少数用微量过盈滚珠的单螺母消除间隙外, 常采用双螺母结构, 利用两个螺母的相对轴向位移,

使两个滚珠丝杠螺母中的滚珠分别贴紧在螺旋滚道的两个相反的侧面上。用这种方法预紧消除轴向间隙时，应注意预紧力不宜过大，否则会使空载力矩增加，从而降低传动效率，缩短使用寿命。

常用的丝杠螺母副消除间隙的方法有单螺母消除和双螺母消除两类。

(1) 单螺母消除。

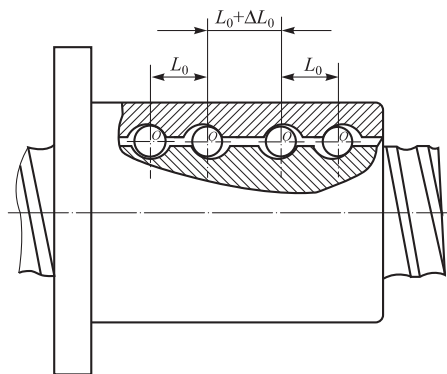


图 3-10 单螺母变位导程预加负荷

调整和预紧极为方便。

① 单螺母变位导程预加负荷。如图 3-10 所示为单螺母变位导程预加负荷，它是在滚珠螺母体内的两列循环珠链之间，使内螺母滚道在轴向产生一个 ΔL_0 的导程突变量，从而使两列滚珠在轴向错位实现预紧。这种调隙方法结构简单，但负荷量须预先设定且不能改变。

② 单螺母螺钉预紧。如图 3-11 所示，螺母的专业生产工作完成精磨之后，沿径向开一浅槽，通过内六角调整螺钉实现间隙的调整和预紧。该专利技术成功地解决了开槽后滚珠在螺母中良好的通过性，单螺母结构不仅具有很好的性能价格比，而且间隙的调整和预紧极为方便。

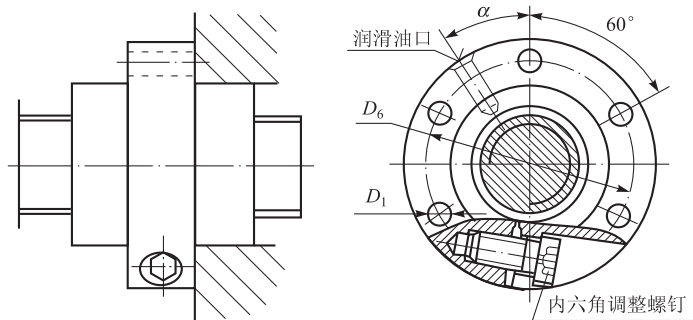


图 3-11 能消除间隙的单螺母结构

(2) 双螺母消除。

① 垫片调隙式。如图 3-12 所示为垫片调隙式，调整垫片厚度使左右两螺母产生轴向位移，即可消除间隙和产生预紧力。这种方法结构简单，刚性好，但调整不便，滚道有磨损时不能随时消除间隙和进行预紧。

② 螺纹调整式。如图 3-13 所示为螺纹调整式，是用键限制螺母在螺母座内的转动。调整时，拧动圆螺母将螺母沿轴向移动一定距离，在消除间隙之后用圆螺母将其锁紧。这种方法结构简单紧凑，调整方便，但调整精度较差，且易于松动。

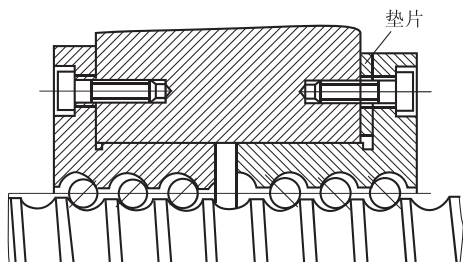


图 3-12 垫片调隙式

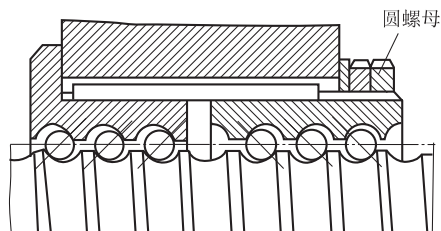


图 3-13 螺纹调整式

③ 齿差调隙式。如图 3-14 所示为齿差调隙式，螺母 1 和 2 的凸缘上各制有一个圆柱外齿轮，两个齿轮的齿数相差一个齿，两个内齿圈 3 和 4 与外齿轮齿数分别相同，并用预紧螺钉和销钉固定在螺母座的两端。调整时先将内齿圈取下，根据间隙的大小调整两个螺母 1、2 分别向相同的方向转过一个或多个齿，使两个螺母在轴向移近了相应的距离达到调整间隙和预紧的目的。

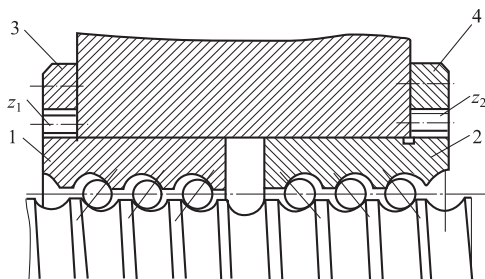


图 3-14 齿差调隙式

1—螺母；2—螺母；3—内齿圈；4—内齿圈

(3) 滚珠丝杠螺母副的预紧力。

滚珠丝杠螺母副预紧的基本原理是使两个螺母产生轴向位移，以消除它们之间的间隙和施加预紧力。为保证传动精度及刚度，滚珠丝杠螺母副消除传动间隙外，还要求预紧。预紧力 F_v 的计算公式为

$$F_v = (1/3) F_{\max}$$

式中， $F_{\max}$ ——轴向最大工作载荷。

上述消除滚珠丝杠螺母副轴向间隙的方法，都对螺母进行预紧。调整时只要注意预紧力大小 $F_v = (1/3) F_{\max}$ 即可。

3.4.5 滚珠丝杠螺母副的支承与制动

1. 滚珠丝杠螺母副的支承方式

数控机床的进给系统要获得较高的传动刚度，除了加强滚珠丝杠螺母副本身的刚度外，滚珠丝杠的正确安装及支承结构的刚度也是不可忽视的因素。滚珠丝杠常用推力轴承支座，以提高轴向刚度（当滚珠丝杠的轴向负载很小时，也可用角接触球轴承支座），滚珠丝杠在数控机床上的安装支承方式有以下几种。

(1) 一端装推力轴承（固定—自由式）。

如图 3-15 所示, 这种安装方式的承载能力小, 轴向刚度低, 只适用于短丝杠, 一般用于数控机床的调节或升降台式数控铣床的立向 (垂直) 坐标中。

(2) 一端装推力轴承, 另一端装深沟球轴承 (固定一支承式)。

如图 3-16 所示, 这种方式可用于丝杠较长的情况。应将推力轴承远离液压马达等热源及丝杠上的常用段, 以减少丝杠热变形的影响。

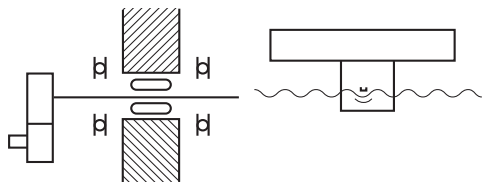


图 3-15 一端装推力轴承

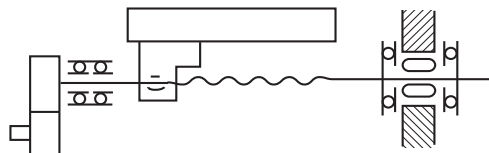


图 3-16 一端推力轴承, 另一端装向心球轴承

(3) 两端装推力轴承 (单推—单推式或双推—单推式)。

如图 3-17 所示, 把推力轴承装在滚珠丝杠的两端, 并施加预紧拉力, 这样有助于提高刚度, 但这种安装方式对丝杠的热变形较为敏感, 轴承的寿命较两端装推力轴承及向心球轴承方式低。

(4) 两端装推力轴承及深沟球轴承 (固定—固定式)。

如图 3-18 所示, 为使丝杠具有最大的刚度, 它的两端可用双重支承, 即推力轴承加深沟球轴承, 并施加预紧拉力。这种结构方式不能精确地预先测定预紧力, 预紧力的大小是由丝杠的温度变形转化而产生的。但设计时要求提高推力轴承的承载能力和支架刚度。

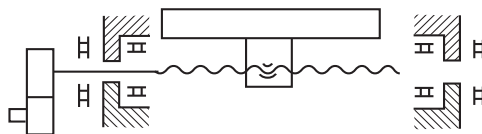


图 3-17 两端装推力轴承

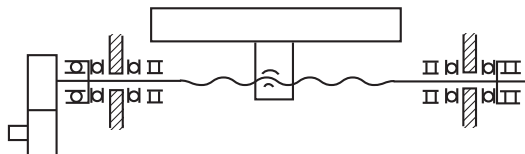


图 3-18 两端装推力轴承及向心球轴承

近年来出现一种滚珠丝杠轴承, 其结构如图 3-19 所示。这是一种能够承受很大轴向力的特殊角接触球轴承, 与一般角接触球轴承相比, 接触角增大到 60° , 增加了滚珠的数目并相应减小滚珠的直径。这种新结构的轴承比一般轴承的轴向刚度提高两倍以上, 使用极为方便。产品成对出售, 而且在出厂时已经选配好内外环的厚度, 装配调试时只要用螺母和端盖将内环和外环压紧, 就能获得出厂时已经调整好的预紧力, 使用极为方便。

2. 滚珠丝杠螺母副的制动方式

由于滚珠丝杠螺母副的传动效率高, 无自锁作用 (特别是滚珠丝杠处于垂直传动时), 为防止自重下降, 因此必须装有制动装置。

如图3-20所示为数控卧式镗床主轴箱进给丝杠制动示意图。制动装置的工作过程：机床工作时，电磁铁通电，使摩擦离合器脱开。运动由步进电动机经减速齿轮传给丝杠，使主轴箱上下移动。当加工完毕，或中间停车时，步进电动机和电磁铁同时断电，借压力弹簧作用合上摩擦离合器，使丝杠不能传动，主轴箱便不会下落。

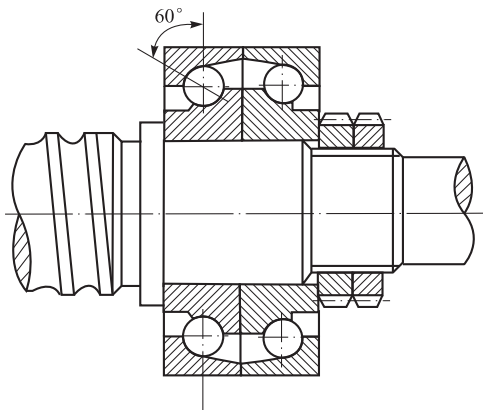


图3-19 接触角60°的角接触球轴承

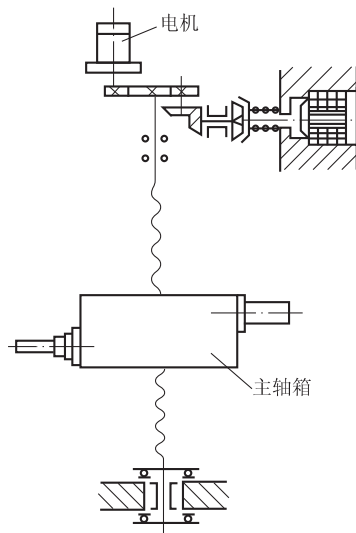


图3-20 主轴箱进给丝杠制动装置

另外，其他的制动方式还有：

- ① 用具有刹车作用的制动电动机。
- ② 在传动链中配置逆转效率低的高速比系列，如齿轮、蜗杆减速器等，此法是靠磨损损失达到制动目的，故不经济。
- ③ 采用超越离合器。

3.4.6 滚珠丝杠的预拉伸

滚珠丝杠在工作时会发热，其温度高于床身。丝杠的热膨胀将使导程加大，影响定位精度。为了补偿热膨胀，可将丝杠预拉伸。预拉伸量应略大于热膨胀量。发热后，热膨胀量抵消了部分预拉伸量，使丝杠内的拉应力下降，但长度却没有变化。需进行预拉伸的丝杠在制造时应使其目标行程（螺纹部分在常温下的长度）等于公称行程（螺纹部分的理论长度等于公称导程乘以丝杠上的螺纹圈数）减去预拉伸量。拉伸后恢复公称行程值。减去的量称为“行程补偿值”。

图3-21是丝杠预拉伸的一种结构图。丝杠两端有推力轴承3、6和滚针轴承支承，拉伸力通过螺母8、推力轴承6、静圈5、调整套4作用到支座上，当丝杠装到两个支座1、7

上之后，拧紧螺母 8 使 3 靠在丝杠的台肩上，再压紧压盖 9，使调整套 4 两端顶紧在支座 7 和静圈 5 上，用螺钉和销子将支座 1、7 定位在床身上，然后卸下支座 1、7，取出调整套 4，把 4 换上加厚的调整套。加厚量等于预拉伸量，再照样装好，固定在床身上。

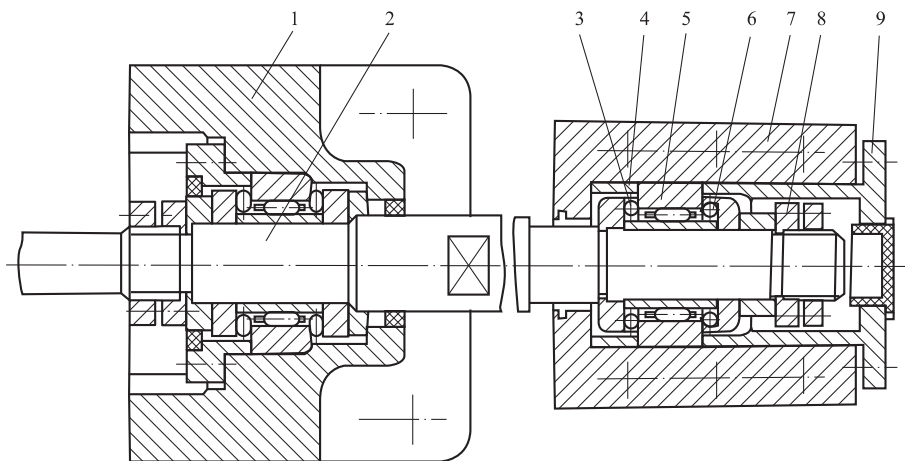


图 3-21 丝杠的预拉伸

1、7—支座；2—轴；3、6—推力轴承和滚针轴承；4—调整套；5—静圈；8—螺母；9—压盖

将丝杠制成空心，通入冷却液强行冷却，可以有效地散发丝杠传动中的热量，对保证定位精度大有益处，由此也可获得较高的进给速度。据介绍，国外的铝合金加工端铣时，进给速度已经达到 70 m/min，这在一般的滚珠丝杠传动上是难以实现的。如图 3-22 所示为带中空强冷的滚珠丝杠传动图。为了减少滚珠丝杠受热变形，在支承法兰处通入恒温油循环冷却以保持恒温状态下工作。

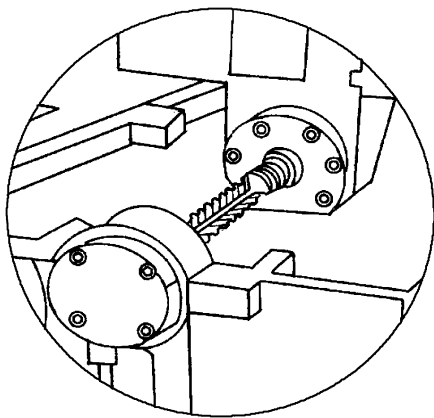


图 3-22 带中空强冷的滚珠丝杠传动图

3.4.7 滚珠丝杠螺母副的防护

1. 支承轴承的定期检查

应定期检查丝杠支承与床身的连接是否有松动以及支承轴承是否损坏等。如有以上问题，要及时紧固松动部位并更换支承轴承。

2. 滚珠丝杠副的润滑和密封

滚珠丝杠副可用润滑剂来提高耐磨性及传动效率。润滑剂可分为润滑油及润滑脂两大类。润滑油为一般机油或 90 ~ 180# 透平油或 140# 主轴油。润滑脂可采用锂基油脂。润滑脂

一般加在螺纹滚道和安装螺母的壳体空间内，而润滑油则经过壳体上的油孔注入螺母的空间内。

3. 滚珠丝杠副常用防尘密封圈和防护罩

(1) 密封圈。

密封圈装在滚珠螺母的两端。接触式的弹性密封圈系用耐油橡皮或尼龙等材料制成，其内孔制成与丝杠螺纹滚道相配合的形状。接触式密封圈的防尘效果好，但因有接触压力，使摩擦力矩略有增加。非接触式的密封圈系用聚氯乙烯等塑料制成，其内孔形状与丝杠螺纹滚道相反，并略有间隙，非接触式密封圈又称为迷宫式密封圈。

(2) 防护罩。

滚珠丝杠螺母副和其他滚动摩擦的传动元件一样，应避免硬质合金灰尘或切屑污物进入，因此必须有防护装置。如果滚珠丝杠螺母副在机床上外露，应采用螺旋钢带、伸缩套筒、锥形套筒以及折叠式塑料或人造革等形式的防护罩，以防尘埃和磨粒黏附到丝杠表面。这几种防护罩与导轨的防护罩有相似之处，一端连接在滚珠螺母的端面，另一端固定在滚珠丝杠的支承座上。

如图3-23所示为钢带缠卷式丝杠防护装置，它的工作过程如下：

防护装置和螺母一起固定在拖板上，整个装置由支承滚子1、张紧轮2和钢带3等零件组成。钢带的两端分别固定在丝杠的外圆表面。防护装置中的钢带绕过支承滚子，并靠弹簧和张紧轮将钢带张紧。当丝杠旋转时，工作台（或拖板）相对丝杠作轴向移动，丝杠一端的钢带拨丝杠的螺距被放开，而另一端则以同样的螺距将钢带缠卷在丝杠上。由于钢带的宽度正好等于丝杠的螺距，因此螺纹槽被严密地封住。还因为钢带的正反面始终不接触，钢带外表面黏附的脏物就不会被带到内表面去，使内表面保持清洁。这是其他防护装置很难做到的。

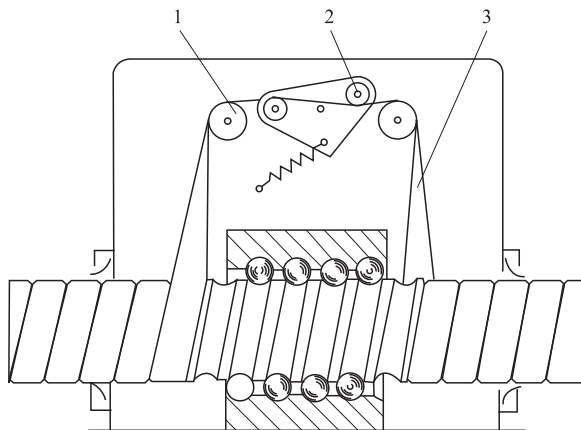


图3-23 钢带缠卷式丝杠防护装置

1—支承滚子；2—张紧轮；3—钢带

3.4.8 滚珠丝杠螺母副的参数、代号、精度等级和标注

1. 滚珠丝杠螺母副的参数

如图3-24所示，滚珠丝杠副的参数有如下7种。

(1) 公称直径 d_0 。

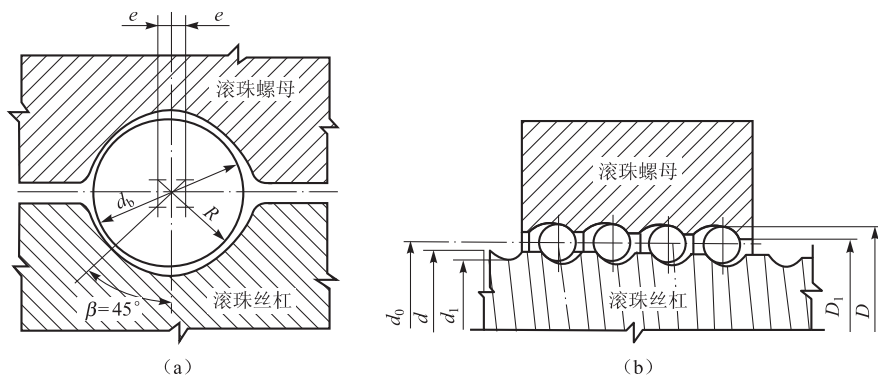


图 3-24 滚珠丝杠副的基本参数

(a) 滚珠丝杠副轴向剖面图; (b) 滚珠丝杠副法向剖面图

滚珠与螺纹滚道在理论接触角状态时包络滚珠球心的圆柱直径,它是滚珠丝杠副的特征尺寸。公称直径 d_0 越大,承载能力和刚度越大,推荐滚珠丝杠副的公称直径 d_0 应大于丝杠工作长度的 $1/30$ 。数控机床常用的进给丝杠,公称直径 d_0 为 $\phi(30 \sim 80)$ mm。

(2) 导程 L 。

丝杠相对螺母旋转任意弧度时,螺母上基准点的轴向位移。

(3) 基本导程 L_0 。

丝杠相对于螺母旋转 360° 时,螺母上的基准点轴向位移。

(4) 接触角 β 。

在螺纹滚道法向剖面内,滚珠球心与滚道接触点的连线和螺纹轴线的垂直线间的夹角,理想接触角 β 等于 45° 。

(5) 滚珠的工作圈数 i 。

试验结果表明,在每一个循环回路中,各圈滚珠所受的轴向负载是不均匀的,第一圈滚珠承受总负载的 50% 左右,第二圈约承受 30%,第三圈约承受 20%。因此,滚珠丝杠副中的每个循环回路的滚珠工作圈数取为 $i = 2.5 \sim 3.5$ 圈,工作圈数大于 3.5 无实际意义。

(6) 滚珠的总数 N 。

一般 N 不超过 150 个,若超过规定的最大值,则因流通不畅容易产生堵塞现象。反之,若工作滚珠的总数 N 太少,将使得每个滚珠的负载加大,引起过大的弹性变形。

(7) 其他参数。

除了上述参数外,滚珠丝杠副还有丝杠螺纹大径 d 、丝杠螺纹小径 d_1 ,螺纹全长 L 、螺母螺纹大径 D 、螺母螺纹小径 D_1 、滚道圆弧偏心距 e 、滚道圆弧半径 R 等参数。

2. 国产的滚珠丝杠螺母副结构类型代号

国产的滚珠丝杠螺母副结构类型代号如表 3-1 所示。

表 3-1 滚珠丝杠螺母副结构类型代号

结 构 型 号	表 示 意 义
W	外循环单螺母式滚珠丝杠副
WI	外循环不带衬套的单螺母滚珠丝杠副
C	外循环插管形的单螺母滚珠丝杠副
N	内循环单螺母滚珠丝杠副
WCH	外循环齿差式调隙式的双螺母滚珠丝杠副
WICH	外循环不带衬套齿差式调隙式的双螺母滚珠丝杠副
WD	外循环垫片调隙式的双螺母滚珠丝杠副
WID	外循环不带衬套垫片调隙式的双螺母滚珠丝杠副
WIL	外循环不带衬套螺纹调隙式的双螺母滚珠丝杠副
CCH	插管形齿差调隙式的双螺母滚珠丝杠副
CD	插管形垫片调隙式的双螺母滚珠丝杠副
CL	插管形螺纹调隙式的双螺母滚珠丝杠副
NCH	内循环齿差调隙式的双螺母滚珠丝杠副
ND	内循环垫片调隙式的双螺母滚珠丝杠副
NL	内循环螺纹调隙式的双螺母滚珠丝杠副

3. 滚珠丝杠螺母副的精度等级

滚珠丝杠螺母副的精度等级及其应用范围如表 3-2 所示。各类机床采用滚珠丝杠螺母副的推荐精度等级如表 3-3 所示。

表 3-2 滚珠丝杠螺母副的精度等级及其应用范围

精 度 等 级		应 用 范 围
代 号	名 称	
P	普通级	普通机床
B	标准级	一般数控机床
J	精密级	精密机床、普通数控机床、加工中心和仪表机床
C	超精级	精密机床、精密数控机床、高精度加工中心和仪表机床

表 3-3 各类机床采用滚珠丝杠螺母副的推荐精度等级

机 床 种 类	坐 标 方 向			
	X (纵向)	Y (升降)	Z (横向)	W (刀杆, 镗杆)
数控车床	B, J		B	
数控磨床	J		J	
数控电火花线切割机床	J		J	
数控钻床	B	P	B	
数控铣床	B	B	B	
数控镗床	J	J	J	
数控坐标镗床	J, C	J, C	J, C	J
加工中心	J, C	J, C	J, C	B
坐标镗床、螺纹磨床	J, C	J, C	J, C	

4. 滚珠丝杠螺母副的标注

滚珠丝杠螺母副的标注方法采用汉语拼音字母、数字及汉字结合标注法，如图 3-25 所示。

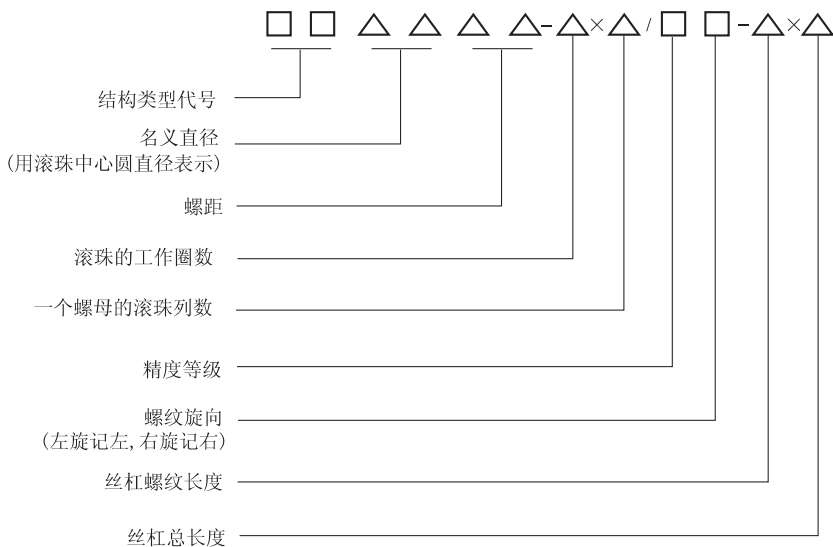


图 3-25 滚珠丝杠螺母副的标注

例如：WD3005-3.5×1/B 左-800×1000。

它表示外循环垫片调隙式的双螺母滚珠丝杠螺母副，名义直径为 30 mm，螺距为 5 mm，一个螺母工作滚珠 3.5 圈，单列，B 级精度，左旋，丝杠的螺纹部分长度为 800 mm，丝杠的总长度为 1 000 mm。

3.4.9 滚珠丝杠副的选择方法

1. 滚珠丝杠副结构的选择

根据防尘防护条件以及对调隙及预紧的要求，可选择适当的结构形式。例如，当允许有时隙存在时（如垂直运动），可选用具有单圆弧形螺纹滚道的单螺母滚珠丝杠副；当必须有预紧和在使用过程中因磨损而需要定期调整时，应采用双螺母螺纹预紧或齿差预紧式结构；当具备良好的防尘条件，且只需在装配时调整间隙及预紧力时，可采用结构简单的双螺母垫片调整预紧式结构。

2. 滚珠丝杠副结构尺寸的选择

选用滚珠丝杠副时，通常主要选择丝杠的公称直径和基本导程。公称直径应根据轴向最大载荷按滚珠丝杠副尺寸系列选择。螺纹长度在允许的情况下要尽量短。基本导程（或螺距）应按承载能力、传动精度及传动速度选取，基本导程大承载能力也大，基本导程小传动精度较高。要求传动速度快时，可选用大导程滚珠丝杠副。

滚珠丝杠副的选择步骤：

在选用滚珠丝杠副时，必须知道实际的工作条件，应知道最大的工作载荷（或平均工作载荷）、最大载荷作用下的使用寿命、丝杠的工作长度（或螺母的有效行程）、丝杠的转速（或平均转速）、滚道的硬度及丝杠的工况，然后按下列步骤进行选择。

- ① 最大的承载能力。
- ② 最大动载荷。对于静态或低速运转的滚珠丝杠，还要考虑最大静载荷是否充分地超过了滚珠丝杠的工作载荷。
- ③ 刚度的验算。
- ④ 压杆稳定性核算。

3.5 静压丝杠螺母副

1. 工作原理

静压丝杠螺母副（简称静压丝杠，或静压螺母，或静压丝杠副）是在丝杠和螺母的螺旋面之间通入压力油，使其间保持一定厚度、一定刚度的压力油膜，当丝杠转动时，即通过油膜推动螺母移动，或进行相反的传动。我国于 1980 年开始在数控非圆齿轮插齿机上应用，随后又在螺纹磨床、高精度滚刀铲磨机床和大型精密车床上应用静压丝杠。