

## 轴承

# 机床中的高效滚动轴承

现如今，市场对支撑高效生产系统的机床的需求正在向高度化、复杂化发展。滚动轴承（以下称为轴承）作为机床的旋转部分，是不可忽略的一环，其性能直接影响机床的性能。

文 | 林 祐一郎 · 捷太格特 JTEKT



高性能轴承系列

## 机床的发展动向

机床目前正在向几个大的方向转变，首先是 5 轴加工机和复合加工机应用的增多。5 轴加工机和复合加工机在 1990 年后半期左右开始在市场上出现，现在已经在市场上广泛普及了，特点是除了切削加工，还附加了研磨加工、检测以及工件搬运机器人等功能。另外，现在还有进一步增加控制轴数量的动向，一种更加复合化的倾向。其次是机床变得更加容易操作。比如在机床中设置自动修正加工中的机械热变位的功能；检查磨具和工件互相干涉的功能；监视运行中的主轴状态的功能（涉及温度、振动、变位等）；以及设备的智能化。这些改变都将使机床变得更加容易操作。然后就是机床向高精度、微细加工的发展。这提高了 DD 电机或直线型电机等构成要素的性能后，使副精密

级的位置决定精度成为了可能。另外就是机床变得更加节省空间。目前，对于大批量生产线的紧凑型的高机能化的要求也很显著。为了更加抑制设备的宽度，提高其维护性，设备宽度 1000 mm 的 5 轴加工机现已问世。最后一点就是机床正在向减少环境负荷的方向发展。油气润滑的空气流量减少和从油气润滑到脂润滑的切换等，市场上出现了很多意识到环境问题而设计的机床。

## 主轴用轴承的技术动向

### 1. 高速性和高刚性的并存

在机床向复合化发展的背景下，这种多品种少批量生产、变品种变批量生产以及工程总和的倾向变得更高。把在多个机械上加工多个工件总合成在一台机床上，或把粗加工、精加工等多个工程总合成少数工程，来对提高生产性能和

节省空间做贡献。因此，对于机床主轴，有了从低速旋转重切削开始向高速旋转轻切削的广范围加工发展的需要，作为轴承，要求高速和高刚性的并存。对于高速，轴承单个的  $dmn$  值（轴承的  $P.C.D. \times$  旋转速度），实现了角接触球轴承为 400~500 万，圆柱滚子轴承为 200~300 万，适应了机床的要求。但是，重视高速的话，对于刚性就会不利。为此主轴的设计，不得不同时重视高速性和高刚性的情况很多。从这里也能看出，维持高速性，并在重切削侧具有必要的刚性是今后轴承开发的一个课题。

### 2. 新润滑方式

润滑大致分为油润滑和脂润滑。一般重视高速加工的场所采用油润滑，低速旋转且重视成本、使用性以及减少环境负荷的场所采用脂润滑。但是随着机床的进步，希望有一种能同时满足两种加工

场合的润滑方式。

作为轴承厂商，对油润滑进行改良，维持高速加工的同时又能节省能源和提高环保性能，或者改善脂润滑的技术的开发正在进行中。也就是说，润滑技术是对轴承性能有很大影响的要素，今后需要展开的课题还有很多。

### 3. 轴承的设计

机床主轴用轴承，根据高速、高刚性、减少环境负荷等各种要求性能，JTEKT 公司目前提供 R、C、D、F 四种型号的高性能角接触球轴承系列（图）。R 型球径小球数多，为重视刚性的设计；C 型球径大，使用陶瓷球，为重视寿命的设计；D 型为在油的供给方法上下功夫重视高速性的设计；F 型为考虑离心力，比 D 型更能适应高速的设计。用户可以根据使用需要选择最合适的型号，各轴承的主尺寸都是按照 ISO 标准，轴或外壳的最低限度的设计变更可替换过去的产品，也能对应提高已有设备的性能。

高性能轴承的性能相比较原来的高速型轴承（ACH 系列），R 型轴承的高速界限提高到了原来轴承的约 1.3 倍，温度上升减少了 20%~30%。滚动体采用陶瓷材料的 R 型轴承，C 型轴承同样，和原来轴承相比也有同样的倾向，使根据使用时的旋转速度重视刚性的 R 型设计和重视负荷能力的 C 型设计的选择成为了可能。根据高性能轴承高速性能的提高和减少温度上升的效果，高速旋转主轴的采用刚性优秀的定位预紧也成为了可能。

在脂润滑条件下，滚动体使用陶瓷的 R 型轴承和油气润滑条件下和原来轴承的升温特性的比较试验结果是，高性能轴承在原来轴承需要油气润滑的领域确认

可以使用脂润滑，有防止油的飞散导致的环境负荷下降，润滑装置废弃导致的成本降低等的效果。关于 R 型号，封入适量润滑脂的付密封圈型也已渐渐提升标准。

这些 R、C 型的轴承和原来轴承同样有能使用脂润滑或油气润滑这两种润滑方法的标准型，但是能使用在更加高速旋转的有油气润滑专用型 D、F 两种，这是采用了考虑这些轴承高速旋转时发生的风障的影响而开发的轴承形状。

D 型轴承和 R 型轴承（球的材质 = 陶瓷）的比较结果是，已确认 D 型轴承有 R 型轴承约 1.1 倍的高速性能，并将温度下降了 5%~10%。由于 D 型轴承的轴承内圈侧面的槽开始至轨道部的油气润滑为直接供给的构造，不易受风障的影响，和原来的油气润滑相比能够使空气的流量减少 20%。而且，减少球产生的风声也成为了可能，通过这些好的特征对于省能源或低噪声有较大的贡献。F 型轴承为在原来轴承的侧面装上注油区，从外圈设置的注油嘴开始向保持架引导面供给油气的超高速旋转用轴承。滑动接触的保持架引导面在急加减速或超高速旋转时保持架的运作有可能不太稳定。但是，可通过从外圈喷嘴供给油气使保持架运作稳定。

和现行高性能圆柱滚子轴承相比较，确认提高了约 1.5 倍的高速性能并减少了约 15% 的温度上升。圆柱滚子轴承的高速化带来的优点使主轴构造能够简单化。通常，主轴后侧的支持构造需要能够根据温度变化来吸收轴的伸缩。圆柱滚子轴承虽适合这个作用，但是由于至今为止圆柱滚子轴承的高速性能不是很完全，在高速主轴后侧

支持上一般还是采用“角接触球轴承 + 副外壳”的构造。但是这次开发的新高性能圆柱滚子轴承由于也可以对应高速主轴，所以能够使轴承周围的构造大幅简单化。

现行的高性能圆柱滚子轴承，在高速旋转时，会发生保持架的破损，使其高速性能有界限，但是只要改善这个缺点能使高速性能更加提高。首先，关于保持架的材料，和原来的聚酰胺树脂相比采用了适合高速旋转的轻量，高强度树脂提高了强度。再者高速旋转时成为类似颈部的构造在保持架和滚子的接触部，使保持架孔内的滚子接触形状最合适化，实现了减少摩擦和低温度上升。另外，套圈材料和原来产品同样，采用容易入手的轴承钢，通过适合高速旋转的内部设计提高了高速性能。

### 4. 高可靠性

为了提高机床的可靠性，必须提高轴承的可靠性。为此根据检测到的轴承温度或振动，来确立轴承的寿命，因此预测技术是不可缺少的。再者，若能检测到轴承上承受的负荷的话，能根据加工状态自我控制出最合适的预紧和润滑，这样的结果，使同时具有高速性能和高刚性宽度很大的加工领域的对应成为了可能。基于此，JTEKT 公司开发了根据转速对轴承付加最合适预紧的独自机构，这个机构能从低速至高速都有充足的刚性，和高输出内装式电动机组合能够使高负荷的加工更加高效率地进行。原来的定位预紧方式，随着转速的增加主轴刚性会增加，但是使用本机机构的情况，特别是高扭矩发生时低速旋转领域的主轴刚性会飞跃性地增加，是适合高负荷加工的预紧方式。[MM]