

数控机床高速电主轴关键技术要点

冯伟炳 张孝忠

友嘉国际数控机床有限公司 浙江 杭州 311200

摘要：作为核心功能部件，数控机床配备了高速电主轴，其性能直接对加工精度及效率造成影响，本文聚焦高速电主轴的关键技术展开研究，着重探究精密轴承、动平衡、润滑冷却等核心环节的技术要点，探讨其对主轴转速、刚度与温升的管控机制，多技术协同优化是增进电主轴可靠性与寿命的关键路径，对助力高端数控装备实现自主化意义重大。

关键词：数控；机床；高速；电主轴；关键技术要点

引言：

高速电主轴凭借电机与主轴的一体化设计，突破了传统机械传动的藩篱，成为现代数控机床达成高效精密加工的关键载体，伴随航空航天、精密模具等领域对加工效率要求的升高，电主轴的转速、精度以及稳定性面临更高难度挑战，国产电主轴在极端工况状态下的耐久性跟国际先进水平存在差距，急切需要突破材料、设计和工艺等关键技术障碍，本研究借助系统梳理技术要点，给行业技术升级提供可借鉴的理论参考。

一、数控机床高速电主轴内容概述

加工精度与切削效能是衡量机床质量的两大指标，轴承作为机床核心功能组件、工业基础零件的关键，对机床性能、品质及可靠性有根本影响，机床特性受总体构造左右，而工件轴承系统特性最为关键，机床的核心性能指标是由轴承结构和精度决定的，高精度数控机床的发展趋势使得主轴必须采用P4级以上的轴承，从而保证加工精度和智能化程度。业界对主轴轴承性能的期望不断提高，比如回转精度的提升、静动态刚性的增强以及极限转速的提高，实现低温升和低摩擦，同时要保证高精度的长期稳定性，用户对于便捷安装、对主轴轴承维护调试及润滑密封的要求持续攀升，主轴轴承的技术革新主要围绕集成化、单元化和智能化展开^[1]。

数控技术突飞猛进，复合加工、高速切削、智能数控、精密制造和绿色生产构成了机床工业技术的发展趋向，前沿技术快速更新，让轴承精度需求呈阶梯式上扬，在机床主轴、工业机器人、新能源电机和空压机等对运转精度要求严格的设备中，精密轴承有着不可替代的关键作用。作为机床基础支撑的关键，精密轴承的各项参数指标与机床的转速极限、旋转精确性、结构刚性、振动抵抗、声学表现、温度上升及热变形程度存在直接关联，我国高端数控主轴轴承与机器人轴承凭借精度高、刚性好、承载能力

强的优势，会在精密机床主轴、机器人、新能源电机及空压机等对精度要求较高的场景中发挥显著作用。伴随前沿科技的进步，高精度轴承技术壁垒逐年上升，基于数控技术的快速发展，当前机床工业技术的主要发展趋势体现在复合化、高速化、智能化、精密化和绿色化等方面，作为机床重要基础零件的精密轴承，其品质会对机床的最高转速、回转精准度、结构强度、减振切削效果、声学表现、温度上升速率以及热致变形程度产生影响，中国高端数控机床主轴轴承与工业机器人轴承将实现高精度、高刚性、高承载以及高稳定性^[2]。

数控机床核心电主轴、数控系统和进给传动缺一不可，正推动高速、精密、高效智能化发展。电主轴逐步替代机械主轴，采用滚动/气浮/液体滑动轴承，具有高精度、低摩擦、长寿命等优势，性能优于传统主轴。

二、国内外高速数控机床主轴轴承发展对比分析

鉴于加工装备、工艺技术等关键环节存在不足，国产机床轴承行业整体发展水平未达到国际先进标准，目前国内有精密机床轴承批量生产与配套能力的企业屈指可数，尽管进口精密轴承产品技术先进、质量有保障，但存在成本过高和交付不及时的问题，国外供应方有可能设置贸易壁垒阻碍流通，大大影响了我国重大装备制造产业的升级进程，直接关联到国家经济安全和社会稳定。受国内高端数

控机床产业整体发展状况的约束，该领域主轴轴承市场目前竞争格局被外资企业掌控，产品仅国内少量轴承企业研发成功，然而在高端机床核心系统实际应用过程中效果不理想，高端功能部件不足正影响中国数控机床产业的高端化进程。配合“中国制造2025”发展规划，要实现装备制造强国战略和落实“中国制造2025”产业规划，可先提升高端数控机床功能部件产业化水平，接着优化精密数控机床核心组件，提高我国高端数控机床核心部件国产替代能力，满足国内机械制造和航空航天事业发展期待。

通过长期实践的积攒，我国机床轴承制造构建起完整产业规模，但国内高端机床轴承在寿命指标和精度参数方面和国际先进标准有差距，集中体现在三点，转速过高是首要考量，就主轴部件而言，在欧美市场，角接触球轴承普遍采用油气润滑工艺，该工况可实现 4×10^6 毫米·转/分钟的 d_{mn} 值峰值，采用油润滑的情况下， d_{mn} 值多处于 $2.0 \times 10^6 \sim 2.5 \times 10^6$ 毫米·转/分钟范围，若采用脂润滑， d_{mn} 值峰值被限制在 2.0×10^6 毫米·转/分钟，采用油气润滑的圆柱滚子轴承，其 d_{mn} 值范围约为 2.0×10^6 至 2.5×10^6 毫米·转/分钟，以角接触球轴承为研究对象进行探讨，国内采用油气润滑的轴承 d_{mn} 值当前是 $1.2 \sim 1.8 \times 10^6 \text{ mm} \cdot \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ，若采用脂润滑的方式， d_{mn} 值可稳定于 $1.0 \times 10^6 \text{ mm} \cdot \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ，转速表现和先进水平相比有距离，精度等级是另一个考量的指标。机床主轴采用的SKF角接触球轴承，出厂默认公差等级为P4A或P7，可实现P2级旋转精度，尺寸误差满足P4要求，SP级公差是圆柱滚子轴承的出厂默认值，采用P4档旋转精度参数，尺寸公差可稳定在P5等级，P5等级往往是机床主轴轴承的最低精度门槛，针对数控机床、加工中心这类高转速精密主轴的轴承，需满足P4及以上精度要求。FAG机床主轴角接触球轴承的标准公差等级采用P4S制，若干重要参数超过P4标准，NSK生产的车床主轴轴承采用P4级标准公差，国内已掌握P4级轴承的生产工艺，目前还未能大规模投产，测定主轴轴承的服役周期，一般不将疲劳寿命作为标准，而是采用精度寿命或磨损寿命进行判定，主轴轴承的滚动体/滚道接触应力多数情况下未触及疲劳极限，球轴承的疲劳极限推荐上限为2200MPa，配合优质的润滑与严密的密封条件，实际运行表现与理论模型高度吻合，然而国产轴承的精度稳定性欠佳。

针对高端数控机床所需的高可靠性、高速超精密轴承的研发测试工作，当前轴承技术体系存在明显缺陷，基础共性技术方面的理论储备不足构成现存缺陷之一，企业研发及测试环节薄弱问题突出，创新体系运作效率偏低，投入

资金有限，专业人才梯队建设滞后。从实际操作维度看，国内生产工艺的技术突破进程相对滞后，多个技术难点的攻关进度迟滞，尤其在重点热处理阶段，从国外文献看，碳化物平均直径基本不超过1微米，满足 ≥ 9.5 级的晶粒规格，实测国内样品碳化物粒度普遍超出 $4 \mu\text{m}$ ，晶粒发育水平多未突破9.5级^[3]。

三、数控机床高速电主轴关键技术要点

（一）精密轴承技术

就电主轴而言，主轴运转高度依赖轴承技术支撑，可归纳为三个类别，可归纳为动静压轴承、角接触球轴承及磁悬浮轴承，采用静压和动压轴承的复合设计构成动静压轴承，整合了静压与动压轴承的长处，高速运转时展现出可靠稳定性，能实现大幅调速，数控精密加工设备中，主轴支撑普遍采用角接触球轴承，主轴能否实现高速运转与此轴承结构密切相关。该现象主要由氮化硅滚珠的材料属性引起，处于高速工作状态时，滚珠的离心力水平升高，自转扭矩数值攀升，高速工况下轴承的工作效率可达到峰值，滚动体的径向尺寸降低，由于轴承加工成本偏高，采用高精度调控技术，难以对轴承发热进行有效调控，因此实际部署需考虑特定需求。

（二）动平衡技术

这些主轴展现出显著的高速运转特性，可达成高精度运转和高效加工，动平衡精度直接关系到这些特性的实现效果，电主轴工作稳定性受多个变量约束，主轴装配环节和制造环节若有偏差，材料均匀性存在不足，会直接形成转动偏心状况，电主轴持续运作的阶段，最高转速范围会超出10000r/min，最大转速可稳定保持在60000r/min以上，部分状况接近100000r/min。鉴于主轴处于转动过程中，即便失衡量极为微弱，也会影响主轴回转精度，从而导致轴承支承体系稳定性下降，所以要高度重视高速电主轴动平衡精度的控制工作，为了增强主轴动平衡性能，电主轴研发期间采用镜像对称格局，对加工装配精度要求加以优化完善。主轴出厂回收后保持初始动平衡水平，可刀具装配之后存在轻微质量分布不均匀状况，会导致刀具磨损或者切屑黏在刀具上，扰动原有的动平衡，对于复杂加工环境而言，主轴刀具系统运行易受切削力激励等关键因素的干扰，离心力和热变形共同作用会导致主轴系统出现问题，降低运行状态的稳定性，为了让电主轴高速转动、数控机床高效可靠连续运行，要设计可在线自动运行的动平衡系统，随应用的发展同步优化并深入挖掘其价值^[4]。

（三）润滑技术

实施高速电主轴润滑行动，主要针对主轴轴承开展润滑，要借助高效润滑系统有效把控轴承温度的上升，实现机床加工系统运行精度的提高并保持其稳定，在决策高速电主轴润滑方式之际，需综合衡量轴承规格、转速范围及负荷特征，可按照实际情况选择油脂润滑、油雾润滑和喷射润滑等方法。

（四）冷却技术

定子单元安装在电主轴的壳体内腔，电主轴运用一体化封闭结构，高转速工作时，因为散热不足，热会在壳体里堆积，电主轴内部有两套发热装置，电动机工作损耗生的热是第一个发热源，轴承工作的摩擦热构成第二个发热源，电机工作阶段会产生热量，主要靠主轴壳体散热，部分热量沿着主轴传导至轴承，致使轴承急剧升温，这会直接让轴承的使用周期减少，热变形会让转轴加工的精准度下滑，主轴系统运行的可靠性出现危机，把循环水冷套安装在定子和壳体相连处，以此冷却电主轴，同时对轴承进行润滑，可有效降低温度，使用合适的润滑技术能够同时进行润滑操作，还能辅助冷却系统。

（五）电机技术

电主轴驱动电机大多用交流异步感应构造，由于永磁电机性能提高，该领域主要采用交流永磁同步电机，实际运转时可以发现，电主轴转子系统做到热量零输出，热变形问题在电主轴中不复存在，转子能量零耗散，电主轴的工作性能实现进一步优化，旋转系统惯量下降，启停过渡更加平稳，处于低转速工况的电主轴，工作特性无明显变化。

（六）精密加工和精密装配技术

当电主轴实现高速回转时，需维持其机械强度及回转精度，主要功能部件需进行精密车削，主要承力部件加工精度应达微米级别，主轴零件组装阶段，需实现高精度配合，就主轴核心结构，应对工件开展精密切削，壳体、轴承座等核心零件的加工精度门槛极高，轴承隔圈随主轴实现高速同转，需实现高精度的加工效果，高速电主轴系统安装刀具阶段，应采用前沿工艺方法，且装配精度必须达到预设值。

（七）温度保护技术

在高速数控铣床开发阶段，需操作冷却装置以降低主轴热负荷，采用三轴承结构支撑主轴，由前部、中部及后部轴承共同支撑，鉴于主轴运转速度各异，在轴承侧边配置温度采集探头，可实时监测主轴轴承的温度波动，温度传感器的数据采集依托PLC输入模块完成，多样的测量探头以4~20mA电流信号形式传输，在机床控制程序开发时，要依据传感器信号运算温度值，实施轴承温度保护方案时也是必需的，实现程序当中门限参数的合理化调配，防止轴承受害。

结束语：

高速电主轴技术是数控机床向高精、高效方向发展的重要支撑。本文研究表明，精密轴承选型、动态平衡补偿及智能温控等技术的融合创新，是突破现有性能边界的关键。未来研究应聚焦智能化监测、新型复合材料应用及能效优化，推动电主轴向超高速、长寿命、低碳化方向发展，助力智能制造装备的迭代升级。

参考文献：

[1]王建军,王英,王帅,杨红军,穆龙涛,张小叶.高速数控车床电主轴过盈配合仿真分析及性能评估[J].机械制造与自动化,2025,54(03):139-144.
[2]高爽,田胜利,王智文,王洪建.基于无轴承电机技术的高速电主轴电磁模拟加载器[J].重庆工商大学学报(自然科学

版),1-8.

[3]赵翔杰.高速电主轴机械振动监测系统研究及测试[D].北华航天工业学院,2024.

[4]蔡小虎.高速电主轴轴承智能监测与控制系统研究[D].上海第二工业大学,2024.

作者简介：冯伟炳（1988.2-），男，浙江省诸暨市，专业：机械设计与制造，研究方向：高端数控机床智造及精密主轴制造研究。张孝忠（1981.10-），男，浙江省建德市，毕业学校：南昌工程学院，专业：智能工程机械运用技术，研究方向：高端数控机床及数控加工技术研究。