

高档数控机床主轴轴承国产化技术路线

哈尔滨轴承制造有限公司总工程师 勇泰芳

一、概述

机床行业是国民经济的基础装备产业，是装备制造业发展的重中之重。机床行业的发展往往代表着一个国家的制造业的发展水平，代表着一个国家装备发展的水平，代表着一个国家工业发展的水平。

近年以来，随着我国各种新兴产业的繁荣和高端装备制造业的发展，随着机械类产品的高精度性、高一致性、高可靠性要求的提升，为之提供加工基础的数控机床随之迅猛发展；尤其对于高档数控机床，其发展与转变升级更是日新月异，传统意义的数控机床已经远远不能满足日益提高质量的产品对其的需求。在此情况之下，多轴联动、复合加工中心，纳米级精度磨床，大尺度、大吨位设备等大量进入国家重点应用领域，更高性能要求的高档数控机床正在逐步扩大其影响范围，并在未来将完全占领机床加工行业。

截止目前，经过几十年的发展与壮大，我国已经逐步成为世界第一机床消费大国以及制造大国。尤其在 2000 年以后，我国数控机床进入黄金发展阶段。2009~2015 年，我国各类机床产品产值持续位居世界前列。数控机床年产量从 2001 年的 1 万台，到 2014 年，达到 39.1 万台。我国已连续十一年成为世界金属加工机床第一消费大国。期间，我国机床工具行业自主创新成果显著，开发了一批高速、精密、复合、多轴联动数控机床，以及一批大规格、大吨位重型、超重型数控机床新产品。

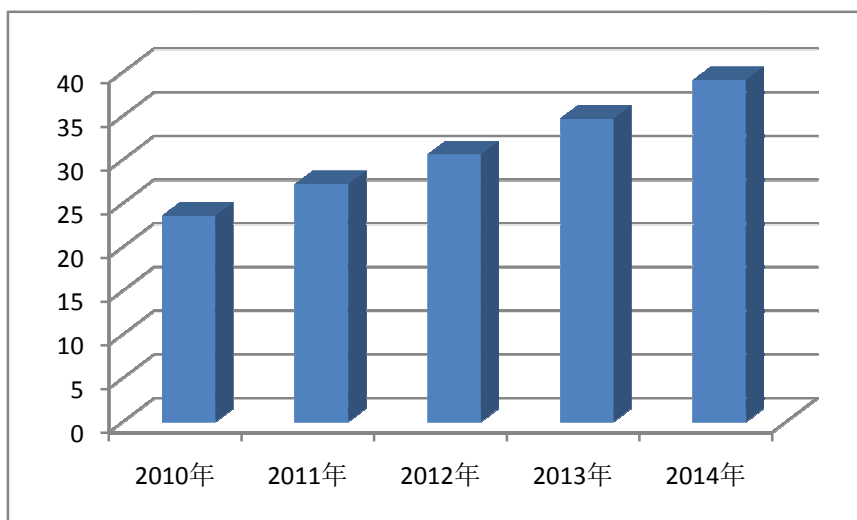


图 1：2010~2014 年中国数控机床产量（万台）

随着数控技术的快速发展，复合、高速、智能、精密、环保已成为当今机床工业技术发展的主要趋势。轴承作为机床的基础配套部件，其性能直接影响到机床的转速、回转精度、刚性、抗振动切削性能、噪声、温升及热变形等，进而影响到机床的本质性能。由于新研发的高档数控机床普遍具有多轴化、多功能化、多性能化要求，因此，对于为其提供可靠的旋转精度、延长的使用寿命、提高的能效水平的核心部件——轴承，其发展亦一日千里。

多年以来，高档数控机床一直是国家重点扶植的研究项目，尤其“十二五”期间，更将“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项具体到主轴轴承等关键部件。但是，由于我国轴承行业整体水平与发达国家存在一定的差距，基础研究缺失、资源供应薄弱、规模化水平低等诸多问题导致了产品优化升级步伐迟缓；进而使轴承成为了制约国产化高档数控机床性能提升的瓶颈之一。

未来中国高档数控机床主轴轴承将以高精度、高刚性、高承载、新材料、新结构、新技术为主要研究方向，国家将逐步加大对高档数控机床主轴轴承的投入力度；相信在不久的将来，高档数控机床主轴轴承将不再是影响国内机床行业发展的瓶颈，而将成为与其发展相得益彰的得力助手。

衡量机床质量的两个标准为精度和切削能力，它们除了决定于机床的整体设计方案外，在很大程度上决定于机床工件主轴——轴承系统。高档数控机床主轴轴承为 P4 级以上精度等级的滚动轴承，轴承的结构和精度在很大程度上决定了机床的性能，如加工精度、表面粗糙度、切削能力以及刚性、抗振性、精度保持性、温升、热变形、噪音、寿命等。随着现代机床向高精度、高效率、高智能化方面的不断发展，对机床主轴轴承也不断提出新的更高要求，如更高的回转精度，更高的静、动刚性，更高的极限转速，更低的温升和摩擦力矩，更高的精度保持性；与此同时更合理方便安装使用、调整维修、润滑密封等诉求也在不断提出，集成化、单元化、智能化已成为数控机床主轴轴承的技术发展目标。

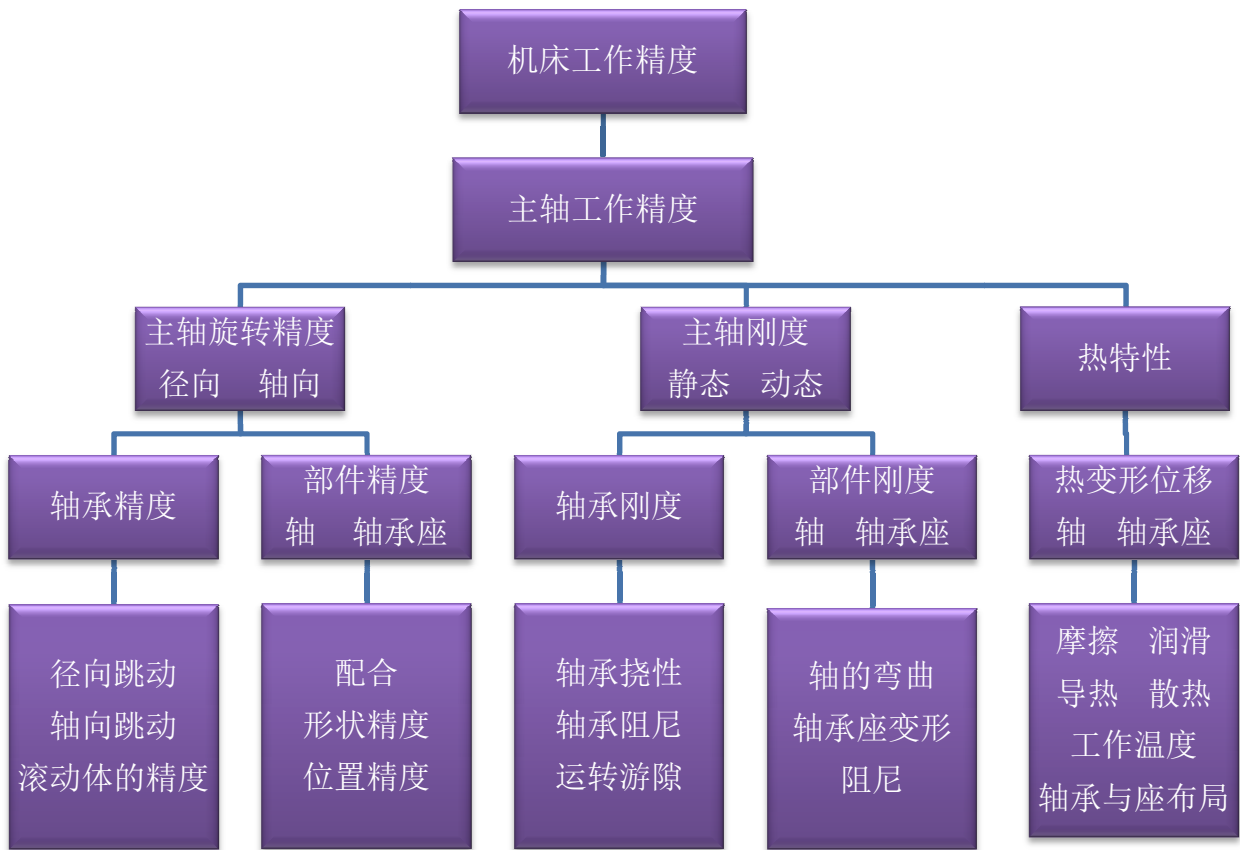


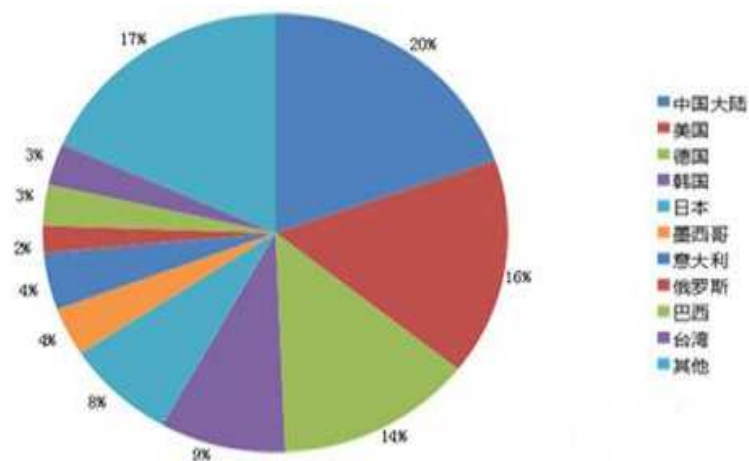
图 2 影响机床工作精度的因素

二、需求与市场

我国自 2002 年开始，机床产品消费额上升到世界第一位，并且连续保持至今。机床消费额从 2000 年的 37.9 亿美元上升到 2010 年的 272.8 亿美元；2011~2014 年，受到世界整体经济形势下行的影响，我国机床消费额有所下降，以 2014 年为例，消费额约 120 亿美元。根据美国 Gardner 公司公布的数据，2014 年全球机床消费金额为 753 亿美元，较 2013 年仅增长 0.3%，全球机床生产连续三年下滑，2014 年全球机床产值为 812 亿美元，较 2013 年下滑 3.1%；中国数控机床行业也持续承压运行，整体处于下行区间。2014 年，国内金属加工机床产量同比下降 2%。

与此同时，国内市场对于进口机床的需求不降反升，2014 年，机床工具进口总额 177.8 亿美元，同比增加 10.8%。这些进口机床产品的需求主要以高档数控机床为核心，以关键系统、零部件为配套主导。可见，高端高档数控类机床产品仍旧是我国机床产业发展的软肋。

产品的精度、可靠性、稳定性、耐用性差，与国外先进的差距明显。国外数控机床无故障时间一般为 2000h 以上，而国内机床一般在 500h 以内。严重缺乏各种先进基础元件，先进配套件大量进口。



2014 年全球机床消费占比

目前，受到国内机床行业发展整体的影响，高档数控机床主轴轴承的市场亦主要被国外轴承生产企业所占有，国内只有少数轴承企业研制开发了部分产品，但是依然难于得到核心高档数控机床的应用与实践的机会。以P4及以上级超精密角接触球轴承为例，国内机床行业年需求约15万套以上，其中，超过50%的产品来自FAG、NSK、SKF、NTN等国外轴承公司，并且，国外轴承公司针对高档数控机床主轴等部位所使用的高端轴承均提供了专业的行业解决方案，以最大程度提供用户满意。可见，对于技术含量高、附加值高、加工难度大的高档数控机床主轴轴承研制，一直是各国轴承企业投入与关注的重点。

轴承的使用性能和产品服务是客户选择轴承产品的主要依据。随着国产超精密轴承的技术指标和可靠性水平的逐步提高，加之国内轴承企业在产品服务以及成本控制上的巨大优势，国产高档数控机床主轴轴承的市场占有率正处于稳步提升之中。目前，我国自主研发、生产的高档数控机床主轴轴承已经逐步替代进口，占据了一定的市场份额，相信随着国内精密轴承的发展与提升，高档数控机床主轴轴承的巨大市场需求必将日渐倾斜于“中国制造”。

三、关键技术

高速电主轴是高速机床的三大关键技术之首，存在的主要问题是轴承寿命低。目前国外公司在钢材、滚动体、保持架、润滑、密封方面进行研究，推出了 $d_m \cdot n$ 值达 $4.0 \times 10^6 \text{mm} \cdot \text{r/min}$ 超高速角接触球轴承主轴轴承。严格预载荷公差的控制保证了主轴刚度的稳定性，减少了由于轴承预载偏差量大而导致的滚动体打滑、发热以及系统卸载而引起的轴承损坏，从而提高了机床正常运转时间。为了满足磨削等一些恶劣环境的要求，开发带有非接触密封的精密主轴轴承以及密封元件等。

要实现高档数控机床主轴轴承国产化，必须解决如下技术关键：

- (1) 仿真与集成设计技术；
- (2) 精准制造和抗疲劳制造技术；
- (3) 材料表面改性和新材料应用技术；
- (4) 润滑技术；
- (5) 试验与评价技术。

下面就高档数控机床主轴轴承国产化的技术现状、面临挑战和发展目标作如下分析：

（一）现状

在数控机床普遍复合化发展的背景下，多品种小批量生产、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。高档数控机床主轴轴承的高速性能要求明显不同于同类其他轴承产品，为了适应机床主轴的高速要求，一般多使用刚性和高速性能优良的配对角接触球轴承，其次使用圆柱滚子轴承；与此同时逐步开发出与之相适应的润滑系统。从表述主轴轴承高速性能的 $d_m \cdot n$ 值 (d_m 为轴承节圆直径 mm, n 为转速 r/min) 来看，脂润滑条件下 $d_m \cdot n$ 值在 0.5×10^6 以下。开发出油气润滑后， $d_m \cdot n$ 值已达到 1.0×10^6 以上。此后开发出了滚动体为陶瓷的角接触球轴承，实现了 $d_m \cdot n$ 值为 2.0×10^6 。到 90 年代开发出喷射润滑后， $d_m \cdot n$ 值可达到 3.0×10^6 。圆锥滚子轴承，单列、双列圆柱滚子轴承在高速性能方面均劣于角接触球轴承。角接触轴承是具有接触角的轴承，接触角越大轴向刚度越好，但因为球与滚道之间的陀螺滑动和自旋滑动也大，因此发热也会增加。为了提高速度性能，方法是减小球的大小（或质量），改变沟道的曲率系数，以减小球的离心力，降低高速运转时产生的内部载荷，同时增加球的数量以提高刚性。

滚动轴承中接触载荷和接触变形之间的关系是非线性的，因此，轴承刚度并不是恒定不变的。但过去许多人对刚度特性的计算过于简化，一般都是把轴承简化成等效弹簧，忽略了刚度随载荷的非线性变化、角刚度以及刚度随旋转速度变化等。即使考虑到上述因素，刚度计算误差也较大。高速主轴轴承仍然需要保证其较高的旋转刚度，以降低变形对加工件误差的影响。超高速时影响电主轴轴承动态支承刚度的因素分为外部和内部两种：外部因素是轴承在超高速运转时的外部工况条件，如电主轴转速、轴承轴向载荷、径向载荷等；内部因素与轴承的设计参数有关，如轴承的设计接触角、套圈滚道的曲率半径以及球滚动体的直径、数量、材料性能等。

在选用高速轴承时，宜选 P4 和 P2 等级精度，以利于形成弹性流体动力润滑。重载高速的大、中型轴承，采用喷油润滑；轻型高速的小型或微型轴承，采用油雾润滑或油气润滑。但三种润滑方式中喷油润滑成本最高，油雾润滑成本最低，油气润滑是近年研制出来的新的润滑方式，它与油雾润滑的根本不同在于能控制最适量的供油量。高速轴承一般选用低粘度油润滑。对于轴承的精度，未来将以超 P4、P2 为主要发展方向，并且逐步要求提高轴承的精度寿命。

由于数控机床主轴轴承的转速要求越来越高，刚度要求也越来越高，因此传统材料的轴承钢对于超高转速的工况往往已经不能满足性能要求。滚动轴承高速运动时的离心力对轴承本身的寿命和强度有很大影响，因此在高速轴承的结构设计上通常采用减少滚动体的质量来提高高速性能，即选用特轻和超轻直径系列，或采用陶瓷材料作滚动体。高速轴承的保持架多用酚醛层压布塑料、聚酰亚胺或青铜等实体保持架，为减小摩擦发热，还可以在引导面上镀银。基于此类轴承的要求，未来高速轴承的滚动体材料将会以氮化硅、氧化锆类陶瓷为主要研究应用方向，研究陶瓷滚动体的高精度加工技术及其轴承的极限转速、额定载荷及寿命修正的方法。陶瓷材料（主要指 Si_3N_4 工程陶瓷）因具有密度小、弹性模量高、热膨胀系数小、耐磨、耐高温、耐腐蚀等优良性能，从而成为制造高速精密轴承的理想材料。陶瓷轴承得到越来越广泛的应用，鉴于陶瓷材料的难加工性，机床主轴用精密陶瓷轴承多为滚动体是陶瓷、内外套圈仍由滚动轴承钢制造的混合陶瓷球轴承。

陶瓷材料 (Si_3N_4) 与轴承钢 (Gcr15) 性能比较

项目	GCr15	Si_3N_4	比
耐热性/ $^{\circ}\text{C}$	180	800	4.44
密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	7.8	3.2	0.41
线膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	12.5×10^{-6}	3.2×10^{-6}	0.26
弹性模量/MPa	20.8×10^4	31.4×10^4	1.52
维氏硬度/HV	700~800	1300~1800	-
泊松比	0.3	0.26	0.87
热导率/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	4.9~50.2	29.3	—
耐蚀性	不良	良	—
磁性	强磁	非磁	—
导电性	导电	绝缘	—

随着滚动轴承向高精度、高转速、高载荷的方向发展，对保持架也提出了更高的要求，因此必须从保持架结构、制造精度、材料选用和加工方法等方面有所创新及改进，才能满足各种类型轴承的需要。保持架设计的基本要求是在一定的空间和结构强度上满足轴承的最大承载载荷和旋转精度及速度的要求，可根据轴承在主机中的使用工况及引导间隙的要求，确定内、外径或滚动体的引导方式，进而确定结构和主参数。滚动轴承在工作时，由于滑动摩擦而造成轴承发热和磨损，特别是在高速运转的条件下，由于离心力、惯性力的作用，加速了轴承内部滚动体、内外圈与保持架的碰撞、摩擦磨损与发热，严重时会造成保持架烧伤和断裂，致使轴承不能正常使用；保持架损坏在轴承失效形式中占很大的比例，而在保持架损坏的原因中，保持架材质好坏又是主要原因之一。因此，要求轴承保持架的材质应具有良好的机械强度，尺寸的稳定性，良好的可塑性和可加工性等多方面性能。保持架则会倾向于重量轻、惯性小、韧性好、强度高的高分子工程塑料方向，需要解决的问题是模塑制造的高分子塑料保持架精度的提高以及其耐温、耐老化研究。针对高转速精密机床主轴轴承的特点，精密机床主轴轴承的保持架需要较高的精度、低摩擦、低磨损等特性。开展保持架兜孔表面加工精度的提升、保持架引导面几何精度和表面质量的提升、保持架加工质量对动平衡精度影响的研究，以提高保持架的整体技术水平。

目前，所有的高精度数控机床主轴都设计了多个配对的高精度滚动轴承。依照传统理论分析，根据单个轴承所承受的负荷，来计算单个轴承的使用寿命，往往满足不了实际生产过程的需要。一般情况下只要主轴上的某个轴承损坏，整个主轴的精度就急剧下降，甚至不能运转。所以，有必要知道主轴上的轴承的疲劳寿命。轴承的疲劳寿命，离散性很大，我们经常使用的寿命计算公式 $L_{10}=(C/P)^{\epsilon}$ ，是表达轴承 90% 的寿命(指一组同型号的轴承，在同样工况条件下运转，其中 90% 轴承能达到不出现片状疲劳剥落的总运转次数或时间，即为基本额定寿命)的理论公式，也即为对单个轴承而言的计算疲劳寿命，具有 90% 的准确率。对多列轴承整体，在某个期间内达到的概率是每个轴承在同一期间内达到概率的累积，所以对于多列轴承整体的基本额定寿命，不能仅以最短寿命的单个轴承为基准，实际比此还要短。

关于滚动轴承疲劳寿命的研究，一直是轴承技术领域中最重要课题之一。长期以来，在基础理论研究和实验验证方面，已经积累了丰富的成果及经验。从疲劳机理、失效形式等因果效应出发，可以采取相应的技术措施，以保证和提高轴承的疲劳寿命。滚动接触疲劳在本质上具有很大的随机性，即滚动轴承初始缺陷的出现和接触疲劳的发生之间是一个极其多变的过程，而且滚动轴承的工况迥异，应用统计学模型(比如 L-P 模型)预测滚动轴承的寿命造成一定的浪费且不能完全消除由于轴承提前失效所造成的事故或征

兆。因而,根据滚动轴承物理属性的改变判定轴承使用寿命的经验寿命模型引起了人们的关注。经验寿命模型本质上是滚动轴承故障诊断与状态监视技术的发展,其指导思想是:轴承工作中的参量与其疲劳和磨损的状态密切相关,分析测量轴承的振动、声发射、温度以及屑沫等寿命特征参数即能判定轴承的剩余寿命。该领域的研究涉及到状态监视与智能诊断的各个方面(统计识别法、回归分析法以及神经网络识别法等)。

为了提高机床的可靠性,必须提高轴承的可靠性。对于数控机床主轴轴承,其精度寿命才是轴承的终极寿命要求。因此,对于目前国内轴承寿命尤其是精度寿命的不可控性,是各轴承企业及研究院所需要重点关注的研究内容。根据检测到的轴承温度或振动,来确立轴承的寿命的预测技术是不可缺少的。通过研究滚动体、套圈表面应力、材料纯净度、及摩擦磨损等对精度寿命的影响和消耗性,总结数控机床主轴轴承的精度寿命预测方法,从而能够预先较为精准的预测轴承的更换周期及其运转成本控制。而针对材料疲劳原因的研究则更趋于改善轴承的应力和材料缺陷,以达到轴承使用寿命拟无限理论的探索与研究。高速轴承的寿命随 $d_m \cdot n$ 值增高而急剧下降,其失效形式以疲劳破坏为主,其次还有因摩擦发热导致保持架引导面烧伤,保持架断裂等情况。

(二) 挑战

对于机床主轴早已从低速旋转重切削开始发展为高速旋转轻切削的广范围加工方式,并且主轴的转速直接影响机床的工作效率和加工产品的精度与表面质量;作为轴承,要求高速和高刚性的并存。所以,轴承高速稳定性能及维持高速性,并在重切削侧具有必要的高刚性是今后轴承开发的一个课题。分析超高速时电主轴轴承的内部动力学状态,研究影响轴承动态支承刚度的因素和影响规律,是优化主轴轴承结构参数、确定最佳工况条件以及改善主轴轴承超高速时动刚度等支承性能的关键所在。在提高轴承转速的要求下,应该进行严格控制滚动体陀螺滑动和自旋滑动的技术研究。在高速旋转时,研究轴承套圈材料在离心力作用下发生膨胀的变化量,及载荷的变化引起的转速变化。高速电主轴轴系转子动力学研究,影响着轴承的超高速性能。

陶瓷滚动体目前在国内研究起步较晚,仅有几家大学及研究所在研究开发;没有形成产业化的企业,仅仅是研制出了一小批样品。与国外相比,我国的陶瓷滚动体及陶瓷轴承和高分子材料保持架的发展形势不容乐观。高精度机床主轴轴承要求轴承的加工精度相对较高,质量较苛刻,如 P4 级轴承要求 G5 级以上的高精度陶瓷球,目前国内能够生产的厂家寥寥无几,产品的稳定性也较差。

很多机床主轴的报废是由于其中的滚动轴承的声音过高或有异常声而造成的,而保持架的磨损断裂正是引起轴承噪声的主要原因之一。因此,要解决轴承的噪声问题,就必须研究轴承保持架的动力学特性。高分子材料保持架动态性能的研究及可靠性的研究,

直接影响着轴承的工作性能；保持架运动的不稳定性，非常容易造成轴承早期失效。尤其应该着重研究高速圆柱滚子轴承和高速角接触球轴承保持架。在不同温度下，各种保持架材料的适应性能及工作性能的研究。聚酰亚胺、聚四氟乙烯、聚醚酮+玻璃纤维、聚醚矾+玻璃纤维及聚醚醚酮等特殊材料的性能研究。

关于滚动轴承保持架多自由度动力学的研究尚不充分，缺乏完善的保持架六自由度模型。在滚动体与保持架的接触作用力的研究中，在瞬态作用力的碰撞模型中应考虑摩擦力的作用，以建立更为准确的力学模型。运用有限元法分析保持架的载荷分布时，可利用有限元分析软件进一步考虑润滑、温度、陀螺效应和电磁力等因素的影响，建立更为全面的有限元分析模型。对于处于混合润滑状态下的轴承滚动体与保持架的作用力计算结果与实际工况还存在差距，需要更为准确的计算模型。轴承保持架材料处于自润滑条件下时的摩擦阻尼因数误差较大，需要在实际的摩擦接触条件下进行试验。对于滚动轴承保持架的转移膜特性及材料的选取需要作进一步研究，尤其对复合材料的保持架在轴承中的应用需作进一步的试验。

机床主轴轴承的精度寿命决定了轴承寿命的可靠性，随着机床工况的复杂性、多变性使准确评估轴承精度寿命极其困难。必须通过大量、长期试验，积累数据量足够大，才有可能分析研究影响轴承寿命的规律性因素，建立预测精度寿命的数学物理模型，得出评估结果。

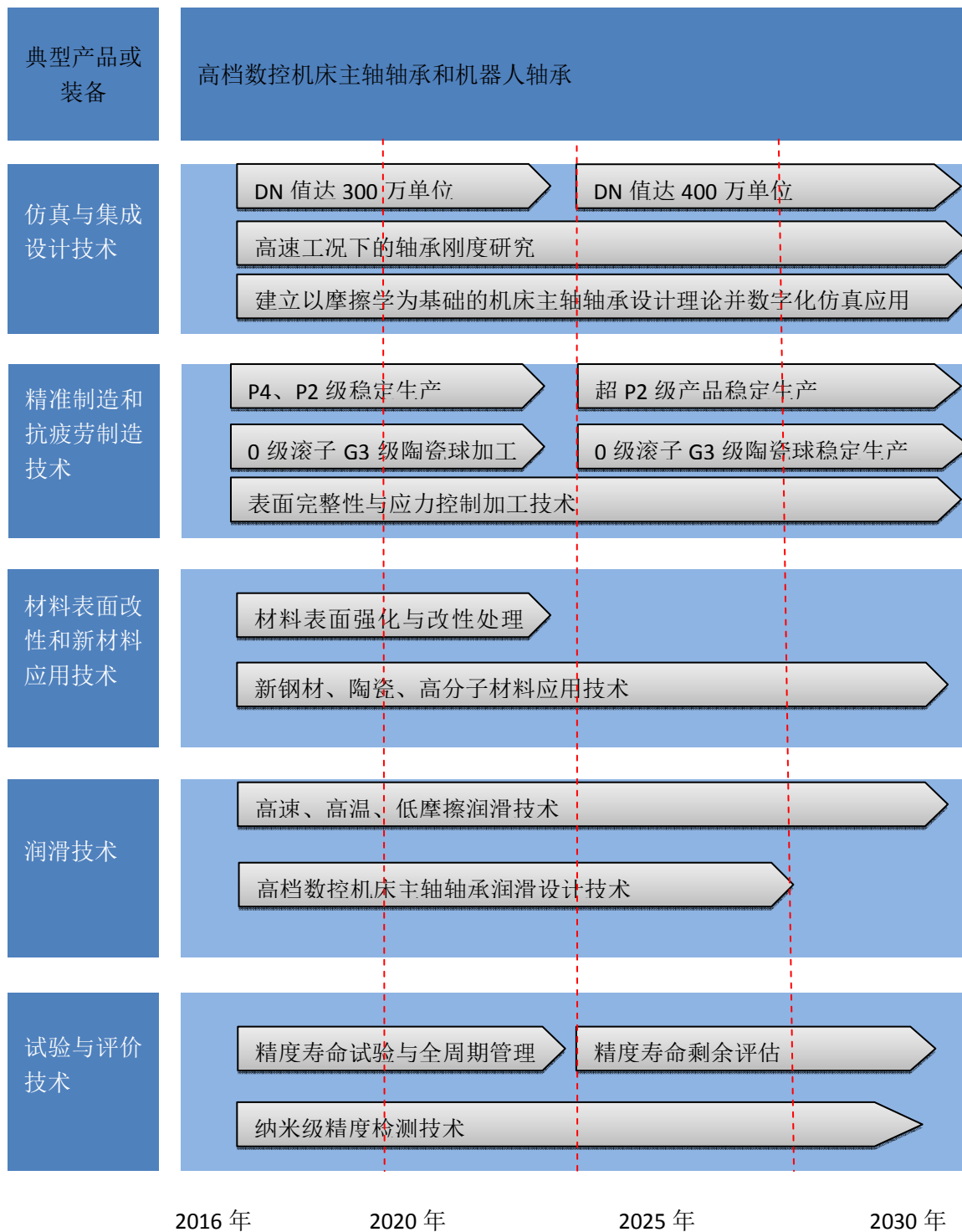
（三） 目标

到 2020 年，重点突破轴承单个的 $d_m \cdot n$ 值达到 3.0×10^6 ；稳定生产 P4 级公差产品；角接触球轴承组配技术、稳定性、精度寿命等参数满足主机大修期限的要求；平均无故障工作时间（MTBF）2000 小时。到 2030 年，全面突破各类机床、各类型主轴轴承 P2 级轴承产品制造，并能够稳定生产；突破精度寿命保障技术；机床主轴轴承基本自主配套。

到 2020 年，重点突破陶瓷球的制坯研究，及高精度陶瓷球的加工工艺方法研究；拓展陶瓷球和高分子保持架材料的种类；使陶瓷球及高分子保持架具有稳定生产的能力。到 2030 年，使陶瓷球及高分子保持架的制造规模扩大，在高精度的保证下，进行低成本研究，使得国内轴承替代进口轴承率达到 80%以上。

到 2020 年，通过精度寿命评估技术研究，实现国产轴承精度寿命的显著提高，达到或接近国际先进水平。到 2030 年，突破修正寿命与无限寿命理论与试验方法；普及轴承失效机理与分析技术；失效轴承剩余寿命预测与评估进入应用。

四、技术路线图



* 勇泰芳：教授级高级工程师，全国滚动轴承标准化技术委员会副主任委员

参考文献：

中国机械工程学会. 中国机械工程技术路线图. 北京：中国科学技术出版社