

专家论文 2:

开阔视野，夯实基础，努力提升研发水平

中国轴承工业协会专家委员会 罗继伟

新中国成立以后，特别是改革开放以来，我国轴承工业取得了令世人瞩目的飞速发展。据中国轴承工业协会统计，2010 年我国轴承总产量已达到 120 亿套，销售收入达到 1200 亿元，已经成为世界排名第二的轴承生产大国。经过多年的引进、消化、吸收，今天我们不少企业的装备水平和制造工艺与跨国公司相比差距已不是很大，凡是重视的产品都可以做到与国外名牌产品接近或者相当，再加上过去多年成本上的优势，我们在通用轴承市场上已占有了相当大的份额。但是，应该清醒的看到，这种进步主要还是体现在中低端普通轴承制造上，体现在劳动密集型和资源消耗型产品上；由于缺乏完备的技术支撑，我们在技术含量高、附加值大的高端轴承市场竞争中还显得力不从心，而这也是制约我们成为轴承强国的瓶颈。

可喜的是，最近十几年，行业内一些有实力的企业已经相继建立了国家级或省级技术中心，有的还建立了博士后工作站，这些机构的建立为提升企业技术实力创造了条件。同时，各级技术中心还肩负着推动行业技术进步的重要使命，他们不仅要做好本企业的工作，而且应站在行业的高度发挥技术引领作用，这就要求他们必须要有开阔的视野，应该充分了解国际轴承技术发展动向，分析差距，选准目标，有针对性地开展工作。

进入新世纪后，国外轴承技术又有了新的发展和突破，这可从以下几个方面加以说明：

一、长寿命特种钢材

优质钢材是支持轴承长寿命的首要条件，上世纪 80 年代，由于各发达国家

轴承钢质量的不断进步，轴承使用寿命普遍有了较大提高，反映在滚动轴承额定动载荷和寿命的国际标准中就是引入了 b_m 系数，将轴承额定动载荷对球轴承提高了 30%，对滚子轴承提高了 10~15%。此后各国对长寿命钢材的研发从未停止，进入 21 世纪后，舍弗勒/FAG 公司推出了一种高氮不锈钢 Cronidur30，它具有更好的金相组织结构，能承受更高的接触应力，其疲劳极限是普通轴承钢的 10 倍，这种材料已应用于 FAG X-life 超长寿命精密轴承中；该公司还开发了一种高性能钢 Cronitect，它是通过表面硬化过程将氮渗透到材料组织中，因而具有优良的耐腐蚀和抗磨损性能。NSK 为长寿命轴承开发出三种钢材，一种是 Z 钢，它具有最低限度的氧含量，Ti, S 含量明显降低，其疲劳寿命是普通轴承钢的 1.8 倍，适用于各类精密轴承；另一种是高纯度、高可靠度 EP 钢，它大大降低了非金属夹杂物含量，疲劳寿命是普通轴承钢的 3 倍，已应用于滚动丝杠轴承；第三种是 SHX 钢，这是一种超长寿命、超高速耐热钢，高速性能比普通轴承钢提高 20% 以上，疲劳寿命是普通轴承钢的 4 倍，在 300° C 以内其耐热性与 M50 钢相当，但耐磨损、耐腐蚀和耐烧蚀性更优，已应用于 NSK Robust 系列高速精密主轴轴承。

二、高性能润滑脂

国外各大公司越来越强调润滑的重要性，认为润滑是影响轴承寿命的关键因素。由于脂润滑适应环保要求，免于维护，成本较低，因此成为优先发展对象。SKF 开发的合成双酯基油润滑脂 LGLT 2 具有低摩擦和长寿命特性，适用于对转速、温度和寿命有较高要求的场合，适用温度范围为 $-30 \sim +110^{\circ} \text{C}$ 。NSK 为精密、高速轴承开发出具有不同特性的高性能脂 MTS、MTE 和 ENS，其中 MTS 在稠化剂中加入了尿素，耐热性极佳，适用于高速轴承；MTE 加入了极压添加剂，能承受很高的接触应力；ENS 可降解，符合环保要求，适应范围广泛。该公司的脂润滑高速主轴轴承，在 $d_m n$ 值为 $1.8 \times 10^6 \text{ mm} \cdot \text{r}/\text{min}$ ，免维护条件下，寿

命可达到 2 万小时。此外，各大公司还对润滑脂寿命、最佳填脂量、补脂时间以及密封与防尘进行了深入研究，这些成果已反映在他们的产品样本中。

三、轴承设计理念

由于长寿命新型钢材和高性能润滑剂的应用，使得轴承使用寿命得到大幅度提高。在这种背景下，国际上在滚动轴承额定寿命的计算中引入了两个新的因素，其一是疲劳极限载荷，过去认为，不管承受多低的载荷，在运行有限长时间后轴承总会因疲劳而失效；现在则认为，当轴承载荷低于疲劳极限载荷时，轴承就具有无限寿命。其二是润滑剂污染系数，它反映了润滑剂对轴承寿命的重要影响，随着润滑剂污染程度的加重，轴承寿命会大幅度降低。新国际标准 ISO 281:2007 在扩展的修正额定寿命计算中使用了一个工况修正系数 a_{ISO} ，它就是疲劳极限载荷和润滑剂污染系数的函数。

在精密高速轴承中，由于广泛采用了新材料，因此各大公司都认为，在实际应用中轴承一般不会因疲劳而失效，此时，考虑额定动载荷（等同于考虑额定寿命）已不再合适。舍弗勒公司认为，在这种情况下保持轴承的运转精度是首要的，为此他们提出验算轴承静载安全系数 $S_0 = C_0/P_0$ ，一般情况下要求 $S_0 > 3$ ，重要场合要求更高；当 $S_0 > 8$ 时，对应的当量载荷已接近疲劳极限载荷；更精确的方法则是通过计算最大 Hertz 接触应力并与轴承额定静载应力进行比较，以判断轴承是否安全可靠。对于脂润滑轴承，各大公司均认为轴承寿命取决于润滑脂寿命，因此他们非常重视长寿命、高效能润滑脂开发。

在产品设计上各大公司重点考虑的是轴承刚度和高速性能。由于轴承刚度与滚动体个数相关性最大，高刚度就意味着滚动体数量较多而直径较小。NSK 的 Robust 系列就是采用了小球径、多钢球设计，而小钢球离心力也小，更利于高速运转；对于更高的转速，则采用陶瓷球。

四、设计应用分析

以摩擦学理论为基础，以完善的试验数据和长期积累的实践经验为依托的轴承设计与分析软件和数据库系统是各大轴承公司研发的重点，集中了很大高端人才进行研究开发。分析软件能够给出不同工况条件下轴承的性能参数，因此可以对产品设计和应用状况进行事前评估。

对于物理数学模型较为完善的轴承分析软件早在上世纪 60-70 年代就开始了研发，以后逐步完善，形成系统。比如 SKF 的 BEAST、CYBEAN，舍弗勒的 BEARINX，NSK 的 BRAIN 等等，这些软件涵盖了各类轴承内部几何关系分析，Hertz 点接触应力与变形分析，滚子线接触应力与变形分析，弹性流体动力润滑分析，轴承系统静力学分析，拟动力学（或拟静力学）分析等。

对于涉及因数较多，数学模型还不够完善但现实中又很重要的问题，各公司则是根据自己的实验数据和积累的经验建立半理论半经验的解析关系或经验公式，借以扩展相应软件的功能，使得能够对轴承的某些重要性能进行估算，比如摩擦、温升、振动、极限转速等等。

上述分析软件与数据库系统和 CAD、CAE 软件相结合形成轴承设计、制造、应用专家系统，成为各大公司的核心技术之一，为产品设计、制造、应用和技术服务提供了强有力的支持。

在一些重要的应用场合，对轴承的精确分析还需要考虑轴承与关联部件的相互影响。在这方面，英国 ROMAX 公司针对齿轮传动系统开发的 ROMAX Designer 软件可以对轴承与齿轮传动系统进行耦合分析与设计。形状更为复杂的结构系统的力学分析需要应用有限元方法（FEM）。最近十几年有限元法在复杂系统分析中得到广泛应用，比如铁路轴箱-轴承系统、轿车轮毂-轴承系统、精密机床主轴-轴承系统等等。

五、评价技术

越是重要的产品越需要对它的工况适应性进行评价。评价体系是企业综合实力的体现，从产品角度讲，主要包括对产品设计、制造和使用性能提出明确要求，提出各个评价环节应该遵循的规范和标准，并通过计算分析、产品检测和性能试验来评估产品是否满足要求。对产品设计，要根据使用状况提出设计输入条件，提出设计参数的约束条件和计算依据，确定精度等级，选用材料和润滑方式，提出安装和配合要求等。为了保证产品最终质量，必须对所有零件的冷、热加工质量以及产品安装配合进行严格控制，目前各大公司都配备了很多专用高档检测仪器，其检测精度已经达到纳米级；同时他们还非常重视开发用于现场安装检测的便携式仪器，为轴承的正常使用提供了保障。对使用性能，首先是进行计算机数字仿真，如果仿真结果不能满足要求，则必须修改设计；评价的一个重要环节是模拟试验，采用的试验装置通常就是实际主机或部件，试验规程和评判条件由制造商与用户共同制定。评价过程最终会形成技术文件，包括设计依据、设计图纸、规范、标准、计算分析报告、检测报告、试验报告等。评价过程也是制造商与用户的沟通过程，在这个过程中会形成一道技术壁垒，对产品开发方形成保护。

以上是对国外轴承技术发展状况的简要介绍，相比之下，我们在研发的广度和深度上还存在较大差距。在轴承设计方面，国内企业往往不重视轴承的应用环境，对工况条件和使用要求缺乏必要的调查研究，因此很难形成有针对性的专门设计。就通用轴承而言，目前轴承行业采用的设计方法主要还是洛阳轴承研究所在上世纪 80 年代制定的，近 30 年过去了基本没有变化；对于轴承额定寿命的计算，虽然完全等效采用了国际标准，但对新引入的疲劳极限载荷和润滑剂污染系数等参数还没有进行过研究；对轴承的一些重要参数，如刚度，预载荷，防尘与密封，润滑脂寿命，极限转速等也很少关注。此外，在细节设计上仍然是停留在经验上，缺乏必要的理论和实验支持，例如球轴承沟曲率半径，保持器兜孔形

状与间隙，引导方式与间隙，滚子凸度，滚子端面与套圈挡边匹配等等。在轴承应用分析方面，虽然一些企业，大专院校和研究所基于不同的应用目的也开发了一些分析软件，但这些软件零星散乱、层次不一，没有统一的标准，所采用的理论模型是否正确，数学方法是否有效没有经过实验验证和专家鉴定，因此难以成为对轴承设计和应用分析有指导作用的辅助工具。对于理论性和技术性较强的这类课题，行业内不少企业也采用了产学研结合的研发模式，但在具体执行过程中，由于各方关心的角度不一样，专业素质有差异，往往无法对研发项目进行深入交流，不能提出明确的目标、任务和验收标准，导致研发结果很少能被企业所采用，只能束之高阁，形成浪费。在评价技术研究方面，行业在检测技术、试验技术以及试验设备和仪器开发上做了一些工作，但对重要产品建立完整的评价体系还未开展过研究。而在特种钢材和高性能润滑脂开发方面，由于体制上的原因，目前轴承行业还无能为力。

上面提到的问题或差距大都涉及到理论、方法、软件工具、标准等软技术，它们是构筑研发平台和技术支撑体系的重要基石，也是目前行业技术工作的软肋之一。在当前轴承行业企业众多，资源分散，产品趋同，人才不足的现状下，要改变这种状态需要付出长期艰苦的努力。中国轴承工业协会应该抓住影响行业技术进步的共性问题，基础问题和重大问题，在把握方向，调配资源，人才培养和组织协调方面发挥重要作用。为此，提出以下几条建议：

- 1、对于具有行业共性和基础性的技术问题，应组织行业内外的专家进行论证，针对各类轴承的设计方法，设计软件，CAD 图形软件，应用分析软件，数据库等提出研发课题，建立项目库，然后分阶段组织实施。积极争取将课题分批分期纳入国家或省、市科研计划，获得经费支持；或者按谁出资谁受益原则，在行业内自筹资金进行研发。

- 2、按照工程化、实用性原则，开展产学研合作研究。充分发挥高校、院所

在基础理论和软件开发上的优势以及企业的专业化、实用性技术优势，解决行业急需的软技术问题。要克服以往的经验教训，合作各方事前必须充分沟通，明确课题的目标和任务，统一软件开发规范，对软件使用说明，软件验收考核办法等提出详细要求，并在执行过程中严格考核。

3、积极、稳妥推进重大主机配套轴承国产化研究。像国产大飞机、高铁等事关生命安全、可靠性要求极高的重大装备，目前国产轴承还不具备进入的条件，原因是我们提不出让对方信服的产品和依据。国产化光靠行政命令不行，轴承行业应该提前准备，创造条件。建议在国家科技支撑计划项目安排下，组织相关各方的研究机构、制造企业、管理部门和高等院校就重大专项轴承评价技术开展研究，建立由供需双方权威部门或中介机构认可的准入条件（评价体系）。之后无论是谁的产品，只要通过评价体系的认证，就有资格进入主机的实际运行考核。

4、加强高层次技术人才培养。目前行业普遍存在研发项目低水平重复，科研课题深入不下去的弊病，根本原因就是缺乏高层次技术人才。发达国家在人才培养方面从未停步，美国轴承制造商协会（ABMA）从1995年起就资助美国宾州大学机械工程学院，每年举办一期“滚动轴承技术短期讲座”，迄今已培养了大批高层次轴承技术专业人才。中国轴承工业协会也应该效仿他们的作法，比如可与河南科技大学合作，每年举办轴承技术短期讲座，也可以开展关于轴承技术的学历或非学历教育培训。

5、由中国轴承工业协会出面与钢铁行业和石化行业沟通，将高端轴承所需的特种优质钢材和高性能润滑脂开发纳入他们的研发计划。轴承行业有实力的企业应重视材料和润滑应用技术研究，比如可开展钢材疲劳极限载荷/应力以及润滑剂、润滑方式对轴承寿命、温升、摩擦力矩、极限转速影响的研究，形成技术储备，积累经验，为参与高端轴承国际竞争创造条件。

建立完备的技术支撑体系，提升行业研发水平是一项基础性、战略性的任

务，是迈向轴承强国的必由之路。轴承行业的各级领导，有责任心的企业家和广大科技工作者应该牢记使命，着眼长远，明确目标，扎实工作，为把我国建设成为轴承强国而努力奋斗。

作者简介：罗继伟，博士，教授级高工，享受国务院特殊津贴专家，中国轴承工业协会专家委员会委员，原洛阳轴承研究所所长、洛阳轴研科技股份有限公司董事长。