

汽车轴承减磨增效技术发展分析

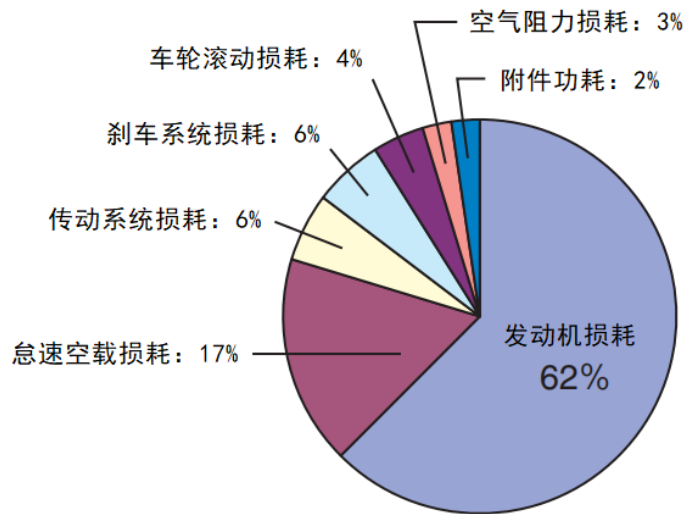
人本股份有限公司总工程师 郭长建

汽车用滚动轴承约占轴承总量的三分之一，有着巨大的配套和售后市场容量，国际上先进轴承企业都把汽车轴承作为一个重要的事业部门来重点研发，全球汽车轴承最发达的企业也都集中欧洲、日本、美国这些工业发达国家，汽车轴承随着汽车工业的规模化、高技术、集约化的发展，对轴承的设计研发、可靠性制造、仿真与试验研究等技术方面都有着先导性的技术需求，汽车轴承市场是开放而竞争充分的应用，新材料、新产品、新工艺等技术大多从汽车轴承领域优先推广应用，长寿命高可靠性汽车轴承的技术水平能够代表轴承行业先进水平，在自动化智能制造和高效率高质量水平方面也处于行业领先地位。

汽车发展趋势是安全、舒适、环保，随着全球温室效应治理和污染物排放严格控制的要求，提高经济性和减少二氧化碳等有害物质排放有了更高的要求，同时也取得长足的进展，随着混合动力和电动汽车的快速发展，在节能和环保方面上升到了一个新高度，大量的汽车轴承分别在汽车发动机、传动系统、转向系统、底盘系统发挥着传递运动和承载的滚动摩擦作用，降低汽车轴承的摩擦阻力提升轴承的运转效率已经成为轴承性能的重要特性，高效率汽车轴承已经在全球头部轴承企业中取得显著节能效果并大量用在汽车的不同功能部件上，汽车轴承的低摩擦高效率的技术发展还在快速迭代发展中。

1. 汽车轴承的应用和摩擦能耗概要： 在提高汽车的燃油经济性和二氧化碳的排放研究方面，分析耗能部件功能和效率，分别研究发动机的效率、怠速空载损耗、传动系统功率损失、刹车功耗、滚动摩擦损失、空气阻力损失、

附件引起的损失，典型汽车功耗损失构成分布研究结果如下：

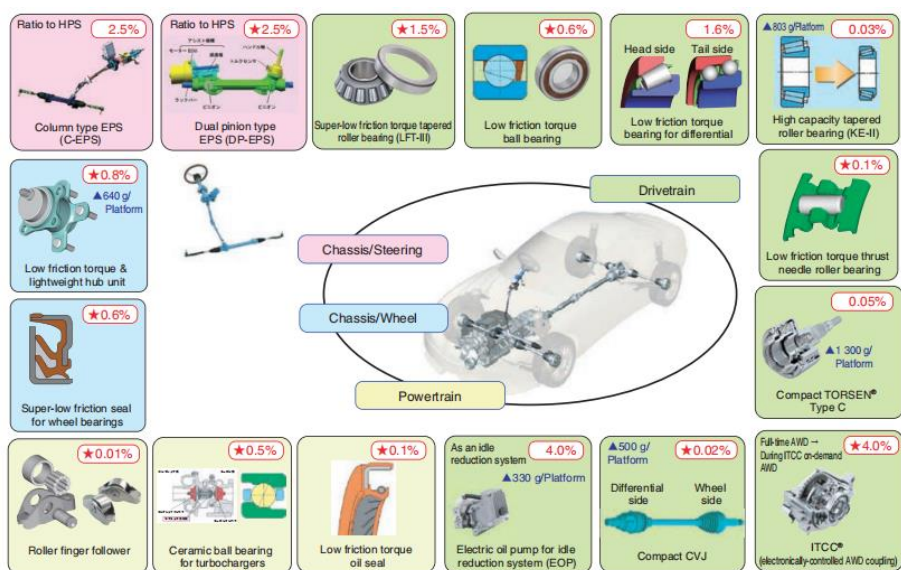


汽车轴承的减磨增效技术引领轴承行业低摩擦技术的发展，节能和新能源汽车的快速发展更要求汽车轴承不仅要有长寿命高可靠性的性能要求，低摩擦高效率也是重要的突出性能指标，在客观上对轴承的摩擦学设计、材料性能、精密制造技术提出了更高的要求，汽车轴承在主要功能部件中发挥着重要作用，同时也对车辆的能耗排放有着重要影响，人本轴承具备全系列各部位轴承的配套能力，低摩擦高效率轴承技术与国际先进水平齐头并进取得显著效果，人本汽车分布在个主要部件中，主要轴承结构类型和分布如下图所示：

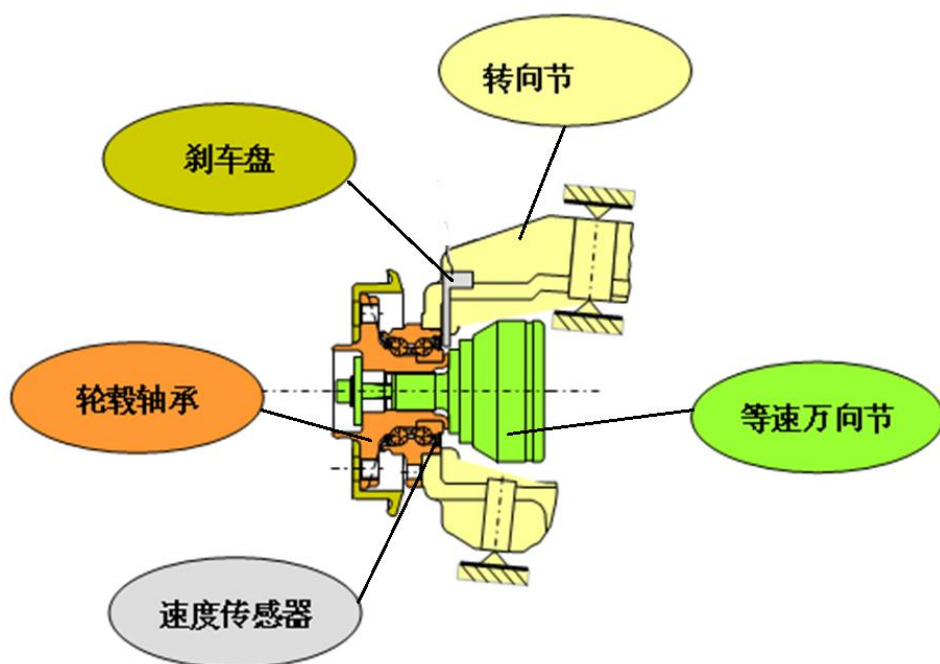


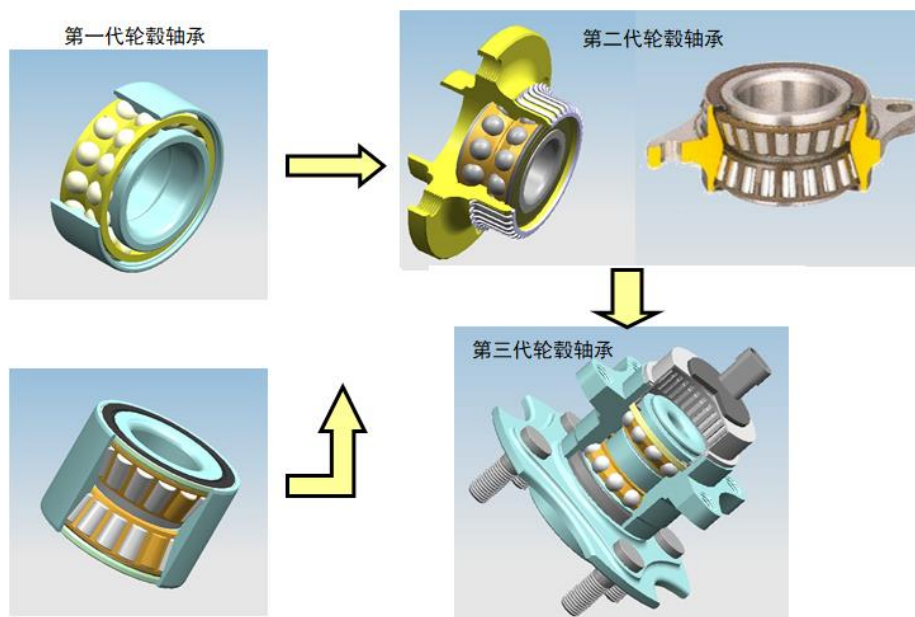
据国外某知名轴承公司的资料信息，一辆 2.5L 四轮驱动越野汽车全系列轴承通过降低摩擦提升效率的技术改进，可提升约 10.7% 的燃油经济性指标，

具体各部位轴承提效指标汇总：



2. 第三代轮毂轴承及低摩擦技术分析：汽车轮毂轴承是高度集成的单元化、免维护轴承组件（见下图），对轴承的可靠性和安全性要求极高，随着汽车行驶过程中的加速、减速、转弯等不同条件的变化，轴承内部在载荷分布、润滑密封状态、摩擦关系时刻发生变化，同时各种路况条件的变化，对轴承的可靠性运转提出了许多技术性挑战和质量的要求，随着汽车工业的发展汽车轮毂轴承不断迭代升级，向轻量化集成化低摩擦方向发展，发展历程的代际演变过程：



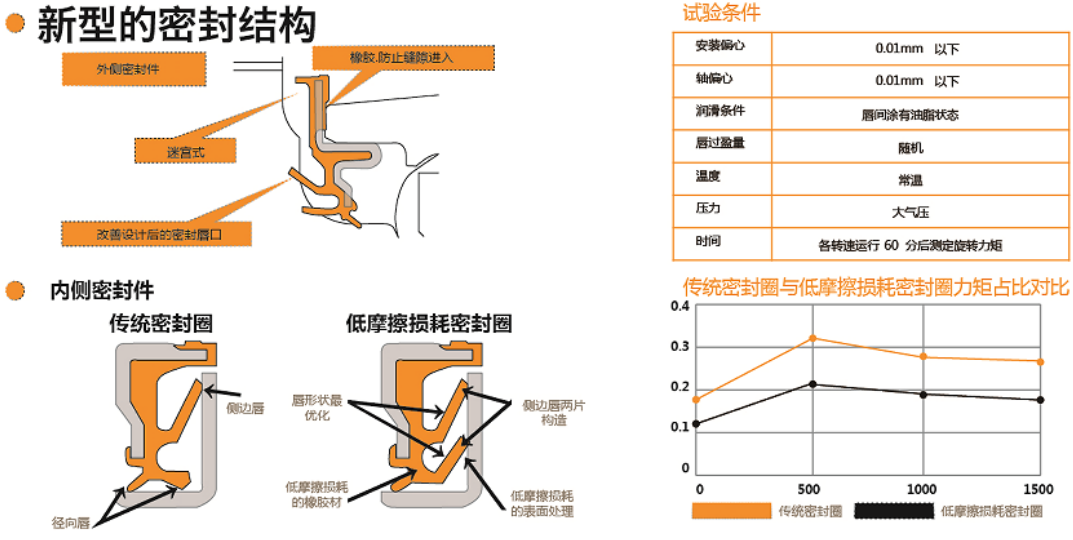


分析研究轮毂轴承结构和摩擦力矩在轴承设计、材料选型、制造精度上进行合理控制，可有效降低轴承总成的摩擦力矩，近些年乘用车轮毂轴承的摩擦力矩有原来的 1.5NM 逐步降低到 0.8NM，取得了显著的效果，随着电动汽车的快速发展，汽车轮毂轴承承担更重的车身，而轮毂轴承的摩擦力矩要求更低，目前轮毂轴承的摩擦力矩先进水平已经达到 0.6NM 以下，高承载、高刚度、低摩擦的发展趋势给轮毂轴承的技术提出更高的要求，轮毂轴承主要摩擦副及影响因素分析：

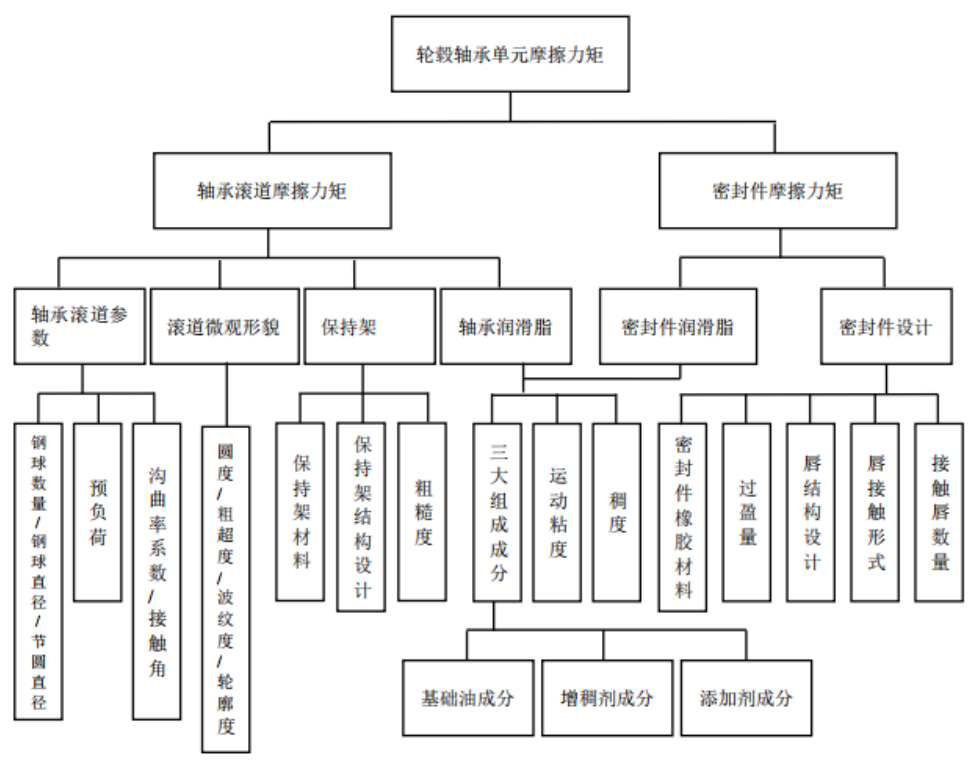
$$\bullet \quad T = T_R + T_S + T_D + T_E$$



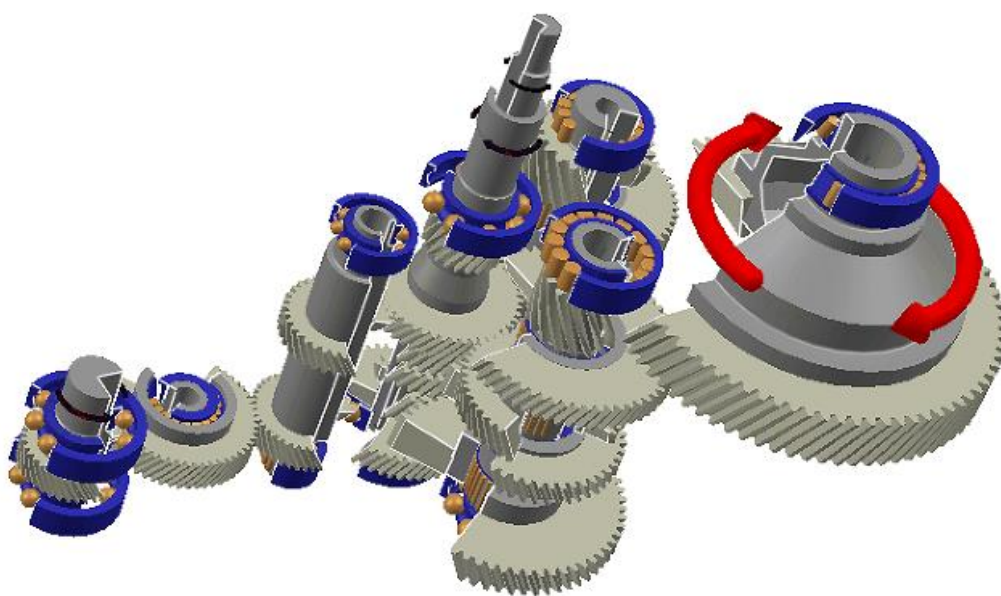
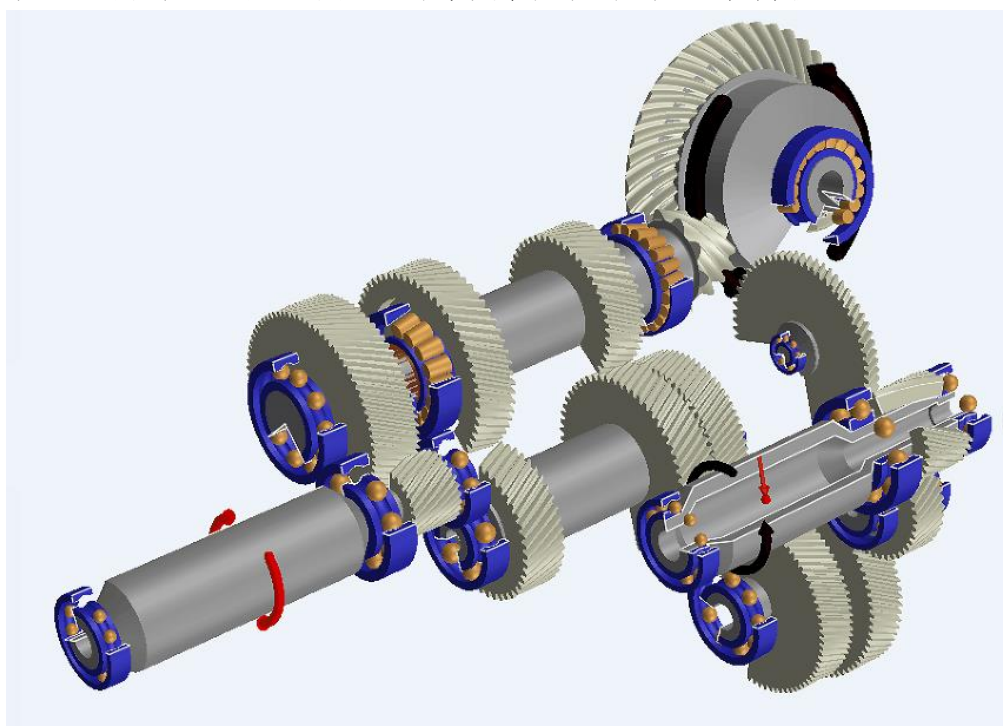
轮毂轴承的多唇组合橡胶密封圈约占轴承总摩擦力矩的近 50%，研究分析改进密封结构设计和橡胶材料组分，在保证密封性能满足要求的前提下，来降低密封件的摩擦阻力， 通过如图所示优化可使摩擦力矩降低约 20%：



轮毂轴承使用寿命是必须保证的主要性能，为了提升车辆的操控性和行驶质感，轮毂的刚性指标也越来越高，加之极限求精来降低轴承的摩擦力矩，必须对轴承的设计和制造精度极致的优化和细化，在各项设计指标和精度控制指标上进行极限挖潜，以保证轴承寿命、刚性、力矩等各项指标协调均衡。

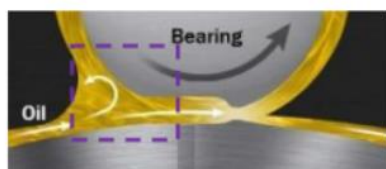


3. 汽车动力传动系统轴承低摩擦技术分析：在汽车各类变速箱中，密集布置大量轴承，随着轻量化、紧凑性的不断优化，客观上给轴承的空间更小、轴承载荷比更大，加之润滑油的污染和频繁的变速变载的使用条件，都对变速箱轴承提出更加严苛的寿命、噪音和可靠性的要求，随着汽车对节能和排放指标要求提高，对变速箱轴承的综合性能尤其是低摩擦性能提出了极为严苛的要求。部分新能源汽车典型动力传动轴承布置结构模型图：



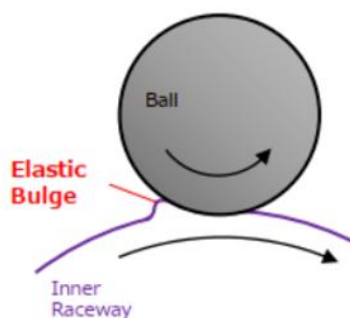
近年来随着新能源汽车的快速发展，新型混和动力和电驱动传动系统快速发展迭代，对轴承的高速性能和急加减速性能提出更高的要求，新能源汽车的极限百米加速和续航里程的要求，推动着汽车驱动电机和齿轮箱轴承向极限接触应力、极限高速、极限低噪音、极限低摩擦技术的转变和升级，全球轴承企业都在该领域进行了大量的研究和改进，以适应性能汽车发展的新需求，汽车动力传动系统主要结构为深沟球轴承和圆锥滚子轴承。

深沟球轴承低摩擦技术主要研究滚动面的力和运动关系，通过优化润滑条件、表面微观形貌、接触区的密合度来实现减摩增效的效果(见下图示例)，通过对轴承保持器采用动力学分析和模拟试验的方法进行轻量化技术改进。



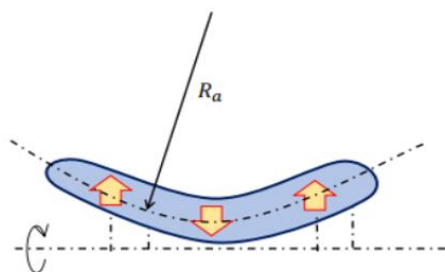
$$F^R = \iint_{\text{contact area}} \pm \frac{dp}{dx} \cdot \frac{h}{2} \cdot dy \cdot dx$$

(1) 周向润滑流体运动阻力

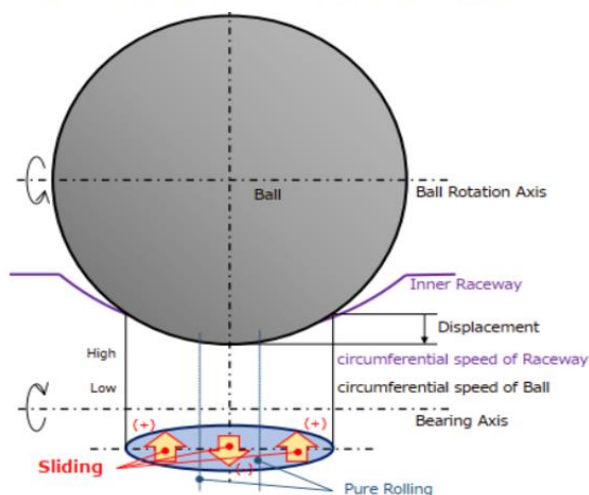


$$M^{ER} = -0.01 * \frac{3}{16} * Q * b * \text{sign}(\omega_R)$$

(2) 接触面弹性变形引起的滚动周向阻力



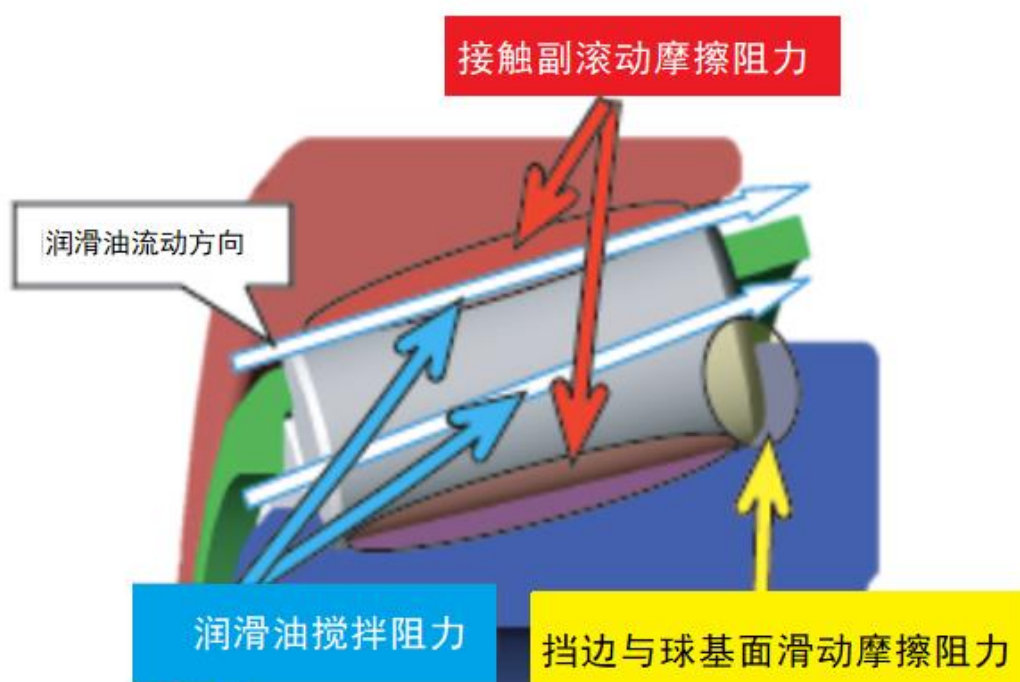
(3) 钢球接触区域接触应力和相对速度差引起的滑动摩擦阻力

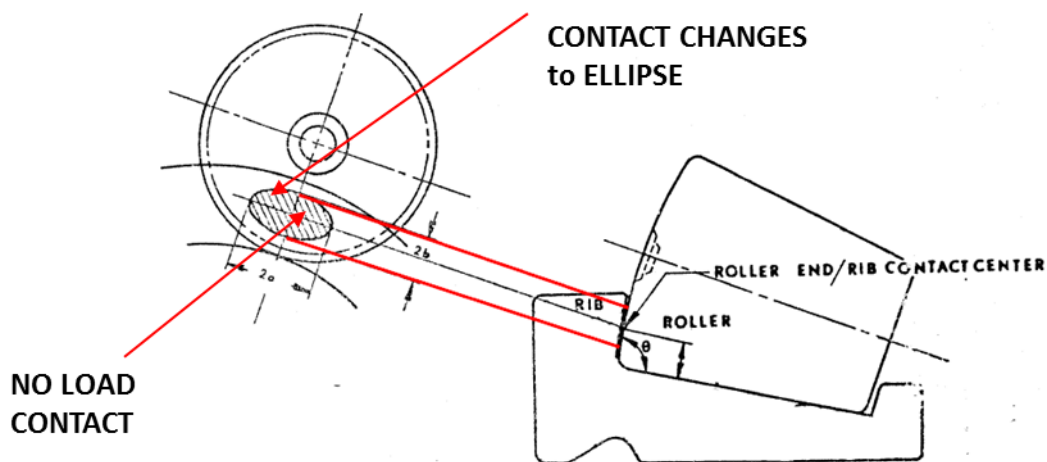




保持架轻量化的演变过程

圆锥滚子轴承具有承载能力强、轴承刚性好的优点，但圆锥滚子的摩擦力矩大的问题也引起行业内高度重视，分析研究轴承结构和运动关系，分析摩擦阻力除了滚动面的滚动摩擦外，还有挡边与球基面的滑动摩擦，也有搅拌润滑油形成的摩擦阻力，摩擦通过优化加工精度和凸度修型可以有效降低，挡边与球基面的摩擦力矩在设计时需严格控制接触区域，并进行 EHL 仿真分析和优化，并通过特殊工艺来保证挡边表面和球基面表面的微观形貌特征，在有效降低挡边处接触应力和应力集中的接触上，促进润滑油膜的形成。





随着轴承仿真分析技术的发展，轴承设计以低力矩、高负荷能力为目标进行充分迭代优化，通过优化外滚道接触角、增大滚子直径、较少滚子数量等设计参数，同时结合精密加工工艺来严格控制角度散差和修型的一致性，可进一步降低圆锥滚子轴承的摩擦阻力，优化设计的低摩擦圆锥滚子的对比结构图片如下：



标准结构圆锥轴承



低摩擦结构圆锥轴承

结论：为适应汽车发展的节能和排放的要求，对汽车轴承在低摩擦高效率的要求日趋严格，这对轴承的设计、材料和加工精度提出了更高的要求和挑战，也是汽车轴承主要企业技术发展的一个重要方向，本文简单阐述汽车轮毂轴承和动力传动系统主要轴承的减磨增效技术研究和实践，同时在汽车部件如转向系统、滚针轴承、电驱系统都有同样要求，通过轴承的减磨增效技术的推进也促进轴承技术水平的全面提升。