

高速重载工况下轴承与联轴器协同优化设计

魏巍, 冯卫国, 岳国艳, 章俊杰

襄阳宇清传动科技有限公司, 湖北 襄阳 441000

摘要： 高速重载工况中机械设备的平稳运行受到了很多挑战，而轴承和联轴器作为关键组成部分，它们的性能好坏直接关系到设备的整体效能。本文深入分析了二者在此工况下的特性，论述了协同优化设计的需求，并揭示了其中存在的配合精度不够高和振动噪声较大等问题，并有针对性地提出了包括结构优化，材料选型和润滑改进在内的策略，目的在于促进系统可靠性的提高和使用寿命的延长，以及有利于产业升级。

关键词： 高速重载；轴承；联轴器；协同优化设计

Coordinated Optimization Design of Bearings and Couplings under High-speed and Heavy-load Conditions

Wei Wei, Feng Weiguo, Yue Guoyan, Zhang Junjie

Xiangyang YUQING Transmission Technology Co., Ltd. Xiangyang, Hubei 441000

Abstract： The stable operation of mechanical equipment under high-speed and heavy-load conditions faces many challenges. As key components, the performance of bearings and couplings directly affects the overall efficiency of the equipment. This paper deeply analyzes the characteristics of these two components under such conditions, discusses the need for coordinated optimization design, reveals issues such as insufficient cooperation accuracy and large vibration noise. Targeted strategies, including structural optimization, material selection, and lubrication improvement, are proposed to system reliability and extend service life, thereby contributing to industrial upgrading.

Keywords： high-speed and heavy-load; bearings; couplings; coordinated optimization

引言

伴随着现代工业向着高速化和重载化的方向快速发展，航空航天，轨道交通以及大型机械制造等诸多领域都对机械设备性能提出了越来越苛刻的要求。在复杂的工作条件下，轴承是支承旋转部件和联轴器用来联接不同轴系以传递动力的关键元件之一，它不可能孤立达到最佳性能。仅依赖单一的优化轴承或联轴器在某些方面，很难满足由于高速重载导致的高负荷、高转速和高可靠性的需求。以高铁列车动力传动系统为例，如果轴承和联轴器配合不佳，很容易诱发振动增大，磨损过快，甚至出现突发故障等问题，危害行车安全。所以，对二者进行协同优化设计研究具有非常现实的意义，也是确保装备高效平稳运行和促进工业进步的关键途径。

一、高速重载工况下轴承与联轴器的特点

（一）高负荷承载特性

高速重载的特点是轴承需要承受巨大的径向和轴向负荷。就风力发电机而言，它的主轴轴承需要支承由叶片旋转所产生的庞大轴向推力和由于风速变化而产生的径向力等载荷，载荷可达几十吨乃至更高。对联轴器而言，与高速旋转和重载轴系相连，需要传递相同数量级的扭矩，其内部结构需要有高强度的抗扭能力，类似于大型船舶推进轴系联轴器，需要可靠地传输主机几万·米量级扭矩以确保船舶航行动力传输的稳定性^[1]。

（二）高速运转适应性

在高速运转的工作条件下轴承的转速往往超过每分钟几千转次。对于航空发动机的主轴承，其工作转速能够超过20000rpm，

这意味着轴承需要拥有出色的动态平衡特性、低摩擦系数，并能减少高速旋转带来的离心力和陀螺力矩等负面效应，以确保其稳定工作。联轴器，在高速运转时，要克服不平衡质量所诱发的震动，它所联接零件的动刚度和阻尼特性都需要进行精细的设计，例如高速离心机联轴器，应以高转速平稳地传递动力以免发生共振而损坏装置。

（三）精度要求严苛

轴承径向跳动，轴向窜动的准确性直接影响着设备的加工精度或者运行的平稳性。精密机床主轴轴承中，要求径向跳动精度达到微米级以确保被加工工件表面质量。联轴器联接两轴时同轴度精度也是一个至关重要的问题，造纸机械高速卷绕系统联轴器同轴度的微小偏差均可造成纸张张力不均匀，起皱甚至断裂等现象，从而影响产品质量^[2]。

作者简介：魏巍（1986.05-），男，汉族，湖北襄阳，本科，机械工程师，研究方向：联轴器和轴承设计和加工。

（四）散热与润滑难题

高转速，重载导致轴承，联轴器的摩擦生热剧增。汽车发动机涡轮增压器轴承在高温，高速的环境中，如果散热不畅，润滑油的黏度下降，氧化增加，磨损增大，寿命急剧下降。联轴器内各相对运动部件之间还需要有效地润滑和散热，象矿山破碎机大功率联轴器一样，如果润滑不充分，温度过高将导致橡胶弹性元件的老化和金属部件的热变形而影响其动力传递性能。

（五）可靠性需求突出

由于设备的维护成本和停机损失较大，轴承和联轴器必须具有高可靠性。石油开采用抽油机系统需要轴承及联轴器在恶劣野外环境中长期平稳工作，经常更换故障不仅会提高成本而且会影响原油开采效率。它的设计需要综合考虑冗余，抗疲劳和耐腐蚀等诸多因素才能确保几年乃至几十年的可靠服役。

（六）动态特性复杂

在高速重载时，系统振动，冲击响应比较复杂。轧钢机在运行过程中，轴承和联轴器在轧制力的冲击作用下，速度起伏较大，振动模式复杂，并涉及到轴系扭转振动和弯曲振动的耦合作用。这些动态特性是互相影响的，如果没有进行深入的研究和优化，将会引起共振，噪声的增加，加快零件的疲劳损坏和降低整个装置的性能^[3]。

二、高速重载工况下轴承与联轴器协同优化设计的必要性

（一）提升系统整体性能

孤立设计容易导致零件之间的性能失配。如在工业机器人的关节部位中，如果轴承的刚度和联轴器的扭转刚度不能协调一致，将造成关节运动的精度降低和响应滞后等问题。协同优化能够将二者的动态特性综合考虑，使得系统能够在高速重载指令的情况下准确动作，有利于提高机器人的工作效率和作业精度以适应复杂生产任务的要求。

（二）延长设备使用寿命

协同设计可以从根本上降低磨损，疲劳失效的发生。在水泥回转窑这种连续运转设备上，通过对轴承和联轴器材质，润滑方式的合理搭配以及接触应力的优化分布可以显著缓解零件表面磨损，推迟了疲劳裂纹的起裂，使设备大修周期由常规几年延长到较长一段时间，减少了企业设备更新成本^[4]。

（三）增强设备运行稳定性

在轴承和联轴器协同情况较好的情况下，可以有效地抑制振动和噪声的传递。例如在地铁车辆牵引系统中，对轴承隔振性能和联轴器柔性缓冲设计进行优化，可以减弱电机振动对车体的传递并减小车内噪声，本实用新型提高了旅客乘坐舒适性的同时降低了由于振动而导致部件松动和疲劳断裂的危险，确保了行车平稳。

（四）降低设备维护成本

协同优化的组件适配性更高，减少了故障概率。以火电发电机组为例，精确设计的轴承和联轴器，减少由于过热和不对中等原因造成的失效，每天巡检和维修工作量减少一半，备品备件替

换频率明显下降，每年都节约了相当大的人力物力成本，增加了电厂的经济效益。

（五）满足复杂工况需求

各行业高速重载工况有较大区别。深海采矿装备中，面对高压，低温，强腐蚀和动力传输等复杂环境，对轴承和联轴器进行了密封，防腐和耐冲击等协同优化设计，使其能够适应极端工况的变化，确保深海资源的顺利开采作业，扩大人类资源开发的界限^[5]。

三、高速重载工况下轴承与联轴器协同优化现存问题

（一）设计理念差异

轴承设计中多聚焦滚动体和滚道的接触力学，润滑特性研究；联轴器的设计重点是扭矩传递，连接刚度的确定。两者在专业领域的知识上是相对独立的，在航空发动机的研制过程中，轴承团队和联轴器团队各自进行优化，整合后往往会产生轴系共振和润滑干涉等现象，由于在高速重载条件下，缺少统一考虑二者协同作用的动，热耦合设计思想^[6]。

（二）配合精度难以保障

在实际组装过程中，由于加工误差，安装工艺等因素，轴承和联轴器之间配合精度会出现较大波动。机床制造过程中即使轴承，联轴器的单体精度合格，安装完成后同轴度也会超差，造成设备开机即产生振动，发热等异常现象，降低关键部件的使用寿命，来自于没有高精度相互配合的工艺保障体系和实时检测调整手段。

（三）材料匹配性欠佳

高速重载要求材料具有综合性能，轴承需要高硬度，耐磨和抗疲劳材料，联轴器还需要同时考虑强度和韧性。但是现有的选材往往是顾此失彼的，例如矿山机械重载联轴器所选用的高强度钢虽然具有足够的抗扭性，却缺乏足够的韧性，这和匹配轴承材料的热膨胀系数相差较大，当工况发生变化时由于热应力的作用触发了配合松动而影响了系统的可靠性^[7]。

（四）润滑系统协同不足

润滑需求不同，但是联系密切。轴承多为油雾，油，气润滑，重点是滚动体的细微间隙的填补；联轴器的润滑重点是对大范围滑动面的保护。在风电设备上，往往由于没有协调好二者对润滑流量，压力的要求，存在轴承缺油和磨损的同时联轴器油池油温升高，润滑油劣化等问题，导致连锁故障的发生，缺少一体化的润滑设计方案。

（五）动态特性分析不全面

高速重载条件下振动，冲击涉及到多物理场耦合问题，目前的分析往往是对模型进行简化处理。例如在汽车变速器轴系中，对轴承和联轴器的动态特性的研究只考虑了扭转振动而忽略了弯曲振动和轴向窜动的耦合作用，使得优化设计之后仍然存在高速啸叫现象、换挡冲击的研究，由于没有准确模拟出复杂工况下的实际动态响应。

（六）缺乏多目标优化方法

现代工程领域中，要想真正做到优化并非易事，需要从各个

方面综合考虑承载能力, 转速稳定性, 使用寿命和成本控制几个关键目标。传统优化方法通常采用对单目标一一突破然后折中的处理方式, 就高速列车动力系统而言, 首先着眼于轴承承载性能优化, 此后又开始对联轴器刚度进行调节, 但在全面考虑阶段, 各单项指标难以同时满足理想情况, 完全不能切合高速重载情境对系统综合性能提出的苛刻要求, 究其根源, 是由于没有一个科学, 系统的整体策略来实现多目标的优化^[8]。

四、高速重载工况下轴承与联轴器协同优化策略

(一) 建立统一设计理念

形成跨学科的队伍, 整合机械设计, 力学, 材料学和传热学的相关知识。本课题组在某航天飞行器姿态控制系统的研制过程中, 自课题开始便对高速旋转部件的运行状态进行了联合解剖, 并考虑了轴承滚动体动力学和联轴器的柔性传动等特点, 在系统工程方法的基础上构造了一个统一的数学模型, 该模型综合覆盖了热, 力和动态耦合因素的影响, 从而建立了协同优化的理论基础^[9]。

(二) 优化配合精度控制

引入了轴承滚道的超精密磨削和联轴器端面的磨铣等高精度加工工艺以控制微米级的尺寸公差。在装配环节中, 利用激光同轴度检测, 对工装进行智能调整, 并对校正情况进行实时监控。在船舶尾轴系统的安装过程中, 据此对轴承和联轴器的相互配合进行精准控制, 以保证轴系运行顺畅, 降低装配误差引起的振动噪声并延长首次检修间隔时间。

(三) 强化材料匹配选型

在高温重载燃气轮机研制这一关键过程中, 基于苛刻的高速重载参数需求, 研制小组开始了精密选材旅程。针对核心部件——轴承, 通过在庞大的材料数据库中进行逐层筛选和比选, 最后确定了使用陶瓷滚动体和高温合金套圈相结合的解决方案, 陶瓷滚动体具有优良的低摩擦特性并配合高温合金套圈优异的耐高温能力为轴承高效运转构筑了坚实的基础。而联轴器这一部分, 选用了镍基合金材质的联轴器, 并且经过反复研究对它的热处理工艺进行了优化, 对热膨胀系数进行了准确的调节, 让它能够和轴承进行完美的配合。然后, 借助于先进模拟软件对其进行全方位的验证, 进而经过多轮次台架试验实战检验, 保证了各组件在极端热环境中能够紧密地配合、平稳无误的动力传递为燃气轮机可靠工作提供了保障。

(四) 构建一体化润滑体系

为了确保大型注塑机动力传动系统平稳工作, 一种新设计的一体化润滑模块诞生了。本模块可实现油液的统筹分配, 核心是利用集中供油泵为全系统供给稳定的油源。面对轴承、联轴器等多种工作状态, 智能流量阀展现出了其卓越的性能。它能够根据各个部分的即时需求, 精准地调整润滑的剂量和压力, 确保关键部位都能获得最佳的润滑效果。同时模块中精心制作的油温和油质监测传感器进行实时把关, 发现异常情况后, 即时对冷却和过滤系统进行反馈控制, 既使润滑协同有效进行, 又大大延长油液使用寿命, 构筑注塑机连续运转之基础。

(五) 深化动态特性综合分析

利用多物理场耦合仿真软件综合考虑了轴系的扭转, 弯曲, 轴向振动和热变形等因素。例如对高速磨床主轴系统建立了包括轴承油膜刚度和联轴器弹性元件等在内的精细有限元模型并对加工过程中的动态激励进行了仿真, 根据仿真结果对其结构进行了优化, 调节轴承的预紧, 联轴器的刚度有效地抑制了共振和促进了加工表面质量的提高。

(六) 推行多目标优化算法

现代智能算法在盾构机刀盘驱动系统优化设计过程中表现出了较强的效能。遗传算法模拟出生物进化的遗传, 变异和选择机制, 粒子群优化算法依靠粒子之间信息共享和协同运动寻找最优解。这些智能算法以轴承承载能力, 联轴器传动效率, 系统可靠性和成本等为重点优化对象, 一头扎在繁杂的参数空间中开始了寻优之旅。经过多次的迭代计算, 它们不断地筛选出劣势的解决方案, 并逐渐形成了 Pareto 的最优解集合。工程师们则可以根据特定项目的苛刻要求, 从解集中谨慎取舍, 准确地选择出最合适的方案, 并最终实现对盾构机刀盘驱动系统整体性能的最大限度优化^[10]。

五、结语

高速重载工况下轴承与联轴器的协同优化设计是提升现代机械设备性能的关键环节。通过深入剖析其特点、明确协同优化必要性、正视现存问题, 进而采取针对性强的优化策略, 如统一设计理念、严控配合精度、匹配材料、完善润滑与动态分析、运用科学算法、规范标准制定等, 有望打破当前设计局限, 实现两者完美协同。这不仅能够保障设备在苛刻工况下可靠运行、延长寿命、降低成本, 还将推动高端装备制造产业迈向新高度, 为各领域技术突破提供坚实的机械基础支撑, 助力我国从制造大国向制造强国稳步迈进。

参考文献

- [1] 于晓东, 高维铖, 伍广鹏, 等. 高速重载工况下静压推力轴承的热特性表征 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2020, 48(09): 79-85.
- [2] 俞扬飞, 樊洪辉, 陈晓萌, 等. 高速重载工况下滑动轴承结构对性能的影响分析 [J]. 计量与测试技术, 2019, 46(06): 1-4.
- [3] 卢黎明, 谷开, 唐俊涛, 等. 高速重载滚动轴承动态有限元对比分析 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019, (07): 26-29+33.
- [4] 李文霞, 魏士杰, 安理会, 等. 高速重载燃油泵齿轮副疲劳寿命预测方法研究 [J]. 中国设备工程, 2023, (20): 196-198.
- [5] 丛韬, 付秀琴, 张斌, 等. 简析高速重载工况对车轮轮辋疲劳裂纹萌生的影响 [J]. 铁道机车车辆, 2014, 34(05): 24-27.
- [6] 顾聪聪, 刘送永, 姚遥, 等. 高速重载码垛机器人动力学仿真 [J]. 包装工程, 2021, 42(07): 186-194.
- [7] 王宇. 高速重载静压推力轴承腔型效应研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2021.
- [8] 高维铖. 高速重载立车静压滑枕支承性能研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2021.
- [9] 彭波, 孔文秦, 贾磊, 等. 高速重载滑滚摩擦副表面损伤的力学特性 [J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(03): 75-82.
- [10] 郭溪泉. 高速线材精轧机油膜轴承 [J]. 太原重型机械学院学报, 2004, (S1): 18-20.