

高精度传动系统中轴承和联轴器的匹配策略

章俊杰, 魏巍, 冯卫国, 岳国艳

襄阳宇清传动科技有限公司, 湖北 襄阳 441000

摘要: 高精度传动系统中轴承和联轴器之间的配合是非常关键的。本文对两者的特点进行了解剖, 明确了匹配的必要性, 揭示了目前存在的如精度适配不良和负载分配不均衡的问题, 有针对性地提出了选择依据工况和优化安装调试的匹配策略。通过算例表明, 合理的匹配能够增强系统的稳定性, 减小振动和噪声, 对传动系统的精密运行起到了保证作用, 有利于相关行业生产精度和生产效率的提高。

关键词: 高精度传动; 轴承; 联轴器; 匹配策略

Matching Strategy of Bearings and Couplings in High-Precision Transmission Systems

Zhang Junjie, Wei Wei, Feng Weiguo, Yue Guoyan

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

Abstract: The cooperation between bearings and couplings in high-precision transmission systems is very critical. This paper analyzes the characteristics of both, clarifies the necessity of their, and reveals existing problems such as poor accuracy matching and uneven load distribution. Targeted selection criteria based on working conditions and optimized installation and debugging matching strategies are proposed. Through examples, it is shown that reasonable matching can enhance system stability, reduce vibration and noise, and ensure the precise operation of the transmission system, which is conducive to improving production accuracy and efficiency in related industries.

Keywords: high-precision transmission; bearings; couplings; matching strategy

引言

随着现代制造业向着高精度和高效的方向迈进, 例如精密机床, 航空航天设备和半导体制造装备等等, 对于传动系统的精度提出了越来越苛刻的要求。轴承是支撑旋转部件最关键的部件, 联轴器承担着将不同轴段联接起来传递扭矩的任务, 两者共同工作于传动链上。一旦匹配不合适, 不但会使传动精度下降, 诱发振动, 发热甚至使设备的使用寿命缩短, 从而严重地影响到系统的整体性能。所以深入探讨它们的匹配策略对于保证高精度传动具有重要的意义。

一、轴承与联轴器的特点

(一) 轴承的类型与特性

常用的轴承包括滚珠轴承, 滚子轴承和滑动轴承。滚珠轴承的滚动摩擦和启动力矩都很小, 适合在高速轻载工况下使用, 就象一个高速的小型电主轴一样, 速度可以达到几万转/分, 使用精密的滚珠轴承就可以满足它的快速启停和稳定旋转的需要; 滚子轴承具有较强的承载能力, 常被应用在重载情况下, 例如在大型轧钢机传动轴支承中, 圆柱滚子轴承能够承受较大的径向力并确保轧辊平稳旋转。滑动轴承拥有出色的阻尼性质, 能够显著地减少振动, 在某些对振动高度敏感的高精度测量设备的低速旋转轴上应用, 可以确保测量的准确性^[1]。

(二) 联轴器的结构与功能

联轴器有很多种, 刚性联轴器构造简单、不具有补偿位移能力、却能够准确地传递扭矩、在同轴度要求很高的单轴传动印刷

设备上、保证印版滚筒和橡皮滚筒之间严格地同步工作; 弹性联轴器内含有弹性元件, 它能补偿某些轴向, 径向及角向的位移, 象泵类联接在电机上, 由于安装基础不同或工作热胀冷缩等原因, 弹性联轴器可以在缓冲冲击和降低瞬间扭矩突变给相连部件造成的破坏的同时吸收位移和保护设备。

(三) 精度指标差异

轴承精度主要集中于尺寸精度和旋转精度等方面, 如 P4 级的高精度角接触球轴承径向跳动可以控制到微米级以保证机床主轴切削过程中刀具轨迹的准确性; 联轴器的精度主要集中于同轴度补偿精度及扭矩传递精度等方面, 例如膜片式联轴器可以在容许角向偏差范围内几乎无损地将电机稳定输出扭矩传递到负载端并保持动力传输精度。

(四) 材料特性对性能影响

轴承材料大多为高碳铬钢和陶瓷, 其中高碳铬钢具有良好的耐磨性和高的承载能力, 在一般的工业齿轮箱轴承中经常使用,

作者简介: 章俊杰 (1987.05-), 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。

对一般的工作条件有较强的适应性；陶瓷材料具有硬度大，质量轻，耐高温等特点，在航空发动机的高速轴承部位使用陶瓷球与钢制套圈配合使用，降低了旋转部件的惯性，增强了耐热性，有利于高转速平稳工作。联轴器的材质、金属材质的刚性足以实现重载刚性连接；弹性联轴器采用橡胶和聚氨酯等弹性材料，通过它们的弹性变形来达到位移补偿和缓冲的目的，就象汽车发动机和变速器之间的橡胶联轴器一样，既要考虑缓冲吸振又要考虑灵活传动^[2]。

（五）适用转速范围

轴承转速受材料强度，润滑条件和结构形式等因素的限制，深沟球轴承通常适合在中低转速下使用，如果要在高速下使用，则需要对其内部结构进行优化和润滑改进，例如，高速磨床主轴用油气润滑专用深沟球轴承，加宽了转速上限；联轴器的转速适用性因型号而异，在高速运转的情况下由于齿面的啮合冲击不应转速太高，膜片联轴器依靠的是轻、薄、强度大的膜片，具有良好的动平衡性能，能与高速动力传输相适应，在燃气轮机发电机组的轴系连接中具有优异的性能。

（六）安装与维护特性

轴承的安装需要严格的控制配合公差，清洁度等，否则会影响旋转精度和使用寿命，而机床主轴轴承的组装往往是在无尘车间内，按照热装或者冷装的过程进行准确的作业；在进行维护的过程中，需要周期性地检查润滑和磨损情况，同时风力发电机的主轴轴承也需要定期进行补脂，并通过振动监测来判断磨损的程度。联轴器的安装应确保最初的同轴度，同时弹性联轴器还要注意弹性元件的老化问题，例如工业泵中使用的弹性柱销联轴器等，经常观察柱销橡胶的弹性情况，并及时更换，以防止传动失效。

二、高精度传动系统中轴承和联轴器匹配的必要性

（一）保障传动精度稳定性

精密数控加工中心中刀具与工件之间的准确运动取决于传动精度。如果轴承和联轴器配合不理想，例如轴承径向游隙太大，联轴器不能补偿对应的位移等，都将导致刀具切削轨迹的偏差积累，被加工件尺寸出现超差现象、形位精度是不可控的，唯有两者准确契合，实现轴旋转支撑至扭矩传递各个环节的协同配合，才能够保证微米级的加工精度的长久稳定性^[3]。

（二）提高系统动态响应特性

自动化生产线上高速搬运机器人在运行过程中经常启停和变速。配套较好的轴承和联轴器配合可以使机械臂关节轴对控制指令迅速准确地做出反应，实现轴承的低摩擦助力起加速和联轴器刚度的合理性、阻尼特性对加减速冲击的抑制作用避免了振动拖影现象的发生，达到了高速高效柔性运行的目的，符合现代智能制造对快速节拍的要求。

（三）延长设备使用寿命

大型矿山破碎机传动系统工作环境较为恶劣，负载冲击较大。适配后的轴承能够均匀承载，联轴器起到缓冲吸振和分散冲

击能量的作用，避免了应力集中对轴颈和键槽等零件造成损伤，减小了疲劳磨损和降低了维修频次，本实用新型使得该装置在重载和长时间的工作中能够维持可靠的工作状态，提高了总体的服役年限并节省了运营成本。

（四）降低系统振动与噪声

电梯曳引系统中轿厢的顺畅运行与乘坐体验密切相关。高精度配对轴承及联轴器，轴承转动顺畅，联轴器光滑传动，可有效减弱不平衡，不对中所诱发的震动，从根本上减少了结构噪声和电机运转噪声的扩散，创造了宁静舒适的乘梯环境并提高了建筑设备的质量^[4]。

（五）适应复杂工况多样性

海洋平台采油设备承受着海水腐蚀，风浪冲击和温度变化的复杂运行条件。特制耐腐蚀轴承配合可补偿大位移万向联轴器不仅可应对平台晃动引起的轴向剧烈变化，还可对高湿高盐环境中的旋转部件进行可靠支承，保证采油作业连续平稳进行，保证了能源开采效率。

三、高精度传动系统中轴承和联轴器匹配现存问题

（一）选型依据不充分

有的企业对新设备的传动设计没有考虑到工况全貌。比如在兴起的3D打印设备中，一些研发团队只是根据电机功率来选择联轴器，并没有结合打印头经常更换方向，低速高精度运动等特性来选择适合于低摩擦高精度轴承和高柔性联轴器，造成打印层纹较粗，定位精度不高，成品质量很难达到预期^[5]。

（二）精度适配失衡

在光刻机这类超精密设备的研究和开发过程中，虽然对关键部件的精度进行了严格的控制，但是对传动链中的轴承和联轴器的精度匹配却疏于管理。采用超高精度轴承但配以低精度联轴器时，轴系的微小偏差会在多级传动的作用下放大，导致曝光台位置不准确，从而影响芯片的光刻分辨率并阻碍半导体产业的升级。

（三）负载分配不均

在多轴联动的工业机器人中，各个关节的负载会随着运动的进行而实时改变。如果轴承，联轴器的选择没有考虑动态负载的特点，往往会发生一些关节轴承快速过载磨损的情况，同时联轴器由于缺乏过载保护，弹性元件提前失效，从而降低了机器人的作业精度和可靠性，提高了维护成本^[6]。

（四）安装调试协同性差

电厂的大型发电机组的安装过程中，每个轴系部件都是通过不同的队伍进行安装的。轴承的安装没有留出联轴器热胀补偿的数量，在调试过程中发现轴系热态对中不理想，出现振动超标现象；或者联轴器找正只注重两个端面的平行而忽略了轴承预紧力的作用，运转后轴承受力不均匀，降低了使用寿命并影响了机组并网发电的过程。

（五）技术标准更新滞后

伴随着新能源汽车电驱动系统向高集成和高转速方向发展，

原有的轴承和联轴器配套标准已经很难适应其要求。按传统标准选择的组件在新系统带来的高频电磁干扰环境中暴露了许多问题。其中轴承电蚀问题日益严重，同时联轴器信号传输受到扰动，不仅会影响动力输出稳定性，造成汽车运行时动力可能中断、抖动等现象也极大地限制着新能源汽车产业技术革新和推迟全产业朝着更高性能和更高效能方向发展^[7]。

四、高精度传动系统中轴承和联轴器的匹配策略

（一）基于工况精准选型

对设备的工作负载谱进行了分析，例如起重机在起升，变幅和回转等各种工况下的负载扭矩和转速的变化范围；综合考虑操作环境温度，湿度和腐蚀介质等因素，化工反应釜的搅拌轴系中，选用耐腐轴承和密封较好的联轴器；根据系统的动态特性，象振动冲击频率一样，给高速冲床选择高刚性联轴器和高阻尼轴承以保证零件在起动，平稳运行至制动等各个环节的适配^[8]。

（二）构建精度匹配体系

以精密光学仪器为例，由光学元件的加工精度反推传动精度要求，根据误差分配原则对轴承旋转精度，联轴器同轴度的精度级别进行了细化，利用高精度的检测手段对关键尺寸进行监测，例如激光干涉仪测量轴承径向跳动，三坐标测量仪检测联轴器的形位公差等，以保证各零件精度梯次的合理性，并协同保证终端的精度。

（三）优化负载分配设计

以重型锻造压力机驱动为研究对象，采用有限元分析对各轴段进行受力仿真，对轴承承载能力进行了合理配置，并根据负载冲击特性选择了抗冲击性能较好的联轴器；介绍了弹性支撑和液压缓冲的配套设备，对轴承负载进行实时调整，在遇到过载的情况下联轴器弹性元件的变形协调一致，平衡了应力并增强了系统的抗疲劳强度。

（四）规范安装调试流程

为风电齿轮箱高速轴系的安装制定了详细的 SOP 方案。首先，利用激光对中仪精确地调整轴承座的同轴度至微米级别，然后在装配轴承时进行温度和热量的控制，并根据联轴器的特性进行精确校正，同时记录冷态的相关数据；在调试过程中对振动，温度进行了监测，并进行了热态复查配对，微调了轴承的预紧情况，确保了由静态装配向动态运行的顺利转换和轴系的稳定运行^[9]。

（五）强化环境适应性措施

户外通信基站天线转台是保证通信顺畅的关键步骤，它的稳定性非常重要。为了抵抗室外恶劣环境的侵袭，转台接合处专门设计有密封轴承和防尘罩，从根本上减少部件损耗的风险。考虑到室外温变幅度较大和紫外线照射强等困难，我们精心选择了耐候性好的橡胶或者金属波纹管联轴器等，这些联轴器灵活地适应环境的变化，保证了动力的准确传递。而且在高湿环境中，轴承内充填的专用润滑脂有效地隔离了水汽侵蚀。与此同时，运维团队还经常进行详细保养，深度清理和各方面护航部件的工作，使

通信信号无论在何种天气情况下均能够平稳传递，为畅通信息架起了桥梁。

（六）推行全生命周期成本管理

在如今充满竞争的商业环境中，一个企业要想获得可持续发展就必须构建一个精细成本核算模型。以轨道交通车辆转向架传动部件的选择为例，企业有必要对各种牌号轴承和联轴器进行严格比较。一方面对其质量可靠性进行了检验并了解了其对复杂工况的耐受程度；另一方面要注意维护周期的长短并清楚多长时间要进行检修保养。尽管优质品牌产品采购价格偏高，但其故障发生率低、使用寿命长。从多个方面权衡考虑，筛选出最具性价比的部件组合才能有效保证车辆全生命周期高效运行并获得最大收益。

（七）跟踪技术标准更新

在科技高速发展的今天，行业协会和企业研发部门，始终密切关注前沿技术发展。它们在新标准的制定过程中，为整个产业的增长提供了强大的推动力。以新能源和人工智能深度结合的智能物流仓储设备为例，根据新出炉的机电耦合传动标准研发团队可以有针对性地甄别和采纳适配新工况的承载。像是具有可自适应调节能力的智能轴承和抗电磁干扰特性突出的联轴器，为装备在新技术涌动的大潮中提供了全方位的保障^[10]。

五、结语

在高精度传动系统中，轴承和联轴器之间的配合是一个复杂而又至关重要的工程环节。深刻认识两者的特点，直面存在的匹配难题，以科学选型，精细安装调试和全维度优化策略确保传动的精度，可靠性和寿命以满足多元工况的要求。这既有助于高端装备制造打破精度瓶颈，也促进了新能源和半导体等新兴产业的发展，同时也为全球科技产业向更高的精度和智能化方向发展打下了坚实的传动基础。

参考文献

- [1] 赵志刚. 高精度伺服传动系统的传动误差分析及优化措施 [J]. 工程机械文摘, 2024, (02):30-35.
- [2] 何芸. 大型重载高精度传动系统关键技术研究及应用. 浙江省, 浙江通力传动科技股份有限公司, 2023-03-11.
- [3] 李西建. 大扭矩高精度大传动比传动系统精度分析和设计仿真 [D]. 燕山大学, 2004.
- [4] 赖天华. 高精度伺服传动系统的设计与实践——双传动链传动的伺服传动系统的设计与探讨 [J]. 电子机械工程, 1997, (04):60-63.
- [5] 范又功. 高精度伺服系统中的谐波齿轮传动 [J]. 制造技术与机床, 1994, (02):19-20.
- [6] 靳峥. 面向指向精度的大口径天线传动系统故障机理分析与误差预测 [D]. 西安电子科技大学, 2023.
- [7] 侯宇. 滚动轴承可靠性评估关键力学参量测试技术及其应用研究 [D]. 北京交通大学, 2022.
- [8] 王子斌. 齿轮传动系统响应仿真与试验及模型修正研究 [D]. 南京航空航天大学, 2018.
- [9] 梁明轩. 变速器系统非线性动力学特性与参数优化研究 [D]. 东北大学, 2014.
- [10] 杨政. 消除齿轮系统精密装配关键参数及其动力学性能影响研究 [D]. 国防科学技术大学, 2014.