

# 高速齿轮箱设计与制造研究

丁树猛 何俞霖 贾俊豪

杭州临江前进齿轮箱有限公司 浙江 杭州 310000

**摘要:** 高速齿轮箱作为高端装备核心传动部件,其设计与制造水平直接影响装备性能。本文围绕高速齿轮箱设计与制造展开研究,分析其核心工作特性与关键设计要求,重点探讨核心零部件设计、制造材料选择与性能优化、精密制造与装配工艺等关键环节。通过参数优化、刚度匹配、材料选型、工艺优化等技术手段,提升高速齿轮箱的可靠性、高效性与稳定性。研究成果为高速齿轮箱的精准设计与高质量制造提供技术参考。

**关键词:** 高速齿轮箱; 零部件设计; 材料优化; 精密制造

**引言:** 随着高端装备向高速化、轻量化、高精度方向发展,对核心传动部件高速齿轮箱的性能提出严苛要求。当前高速齿轮箱在高速工况下易出现振动、温升过高、磨损加剧等问题,制约了装备整体性能提升。因此,开展高速齿轮箱设计与制造研究极具现实必要性。本文立足高速齿轮箱工作特性,从核心零部件设计、制造材料优化、精密制造与装配工艺等方面展开系统研究,旨在攻克设计与制造中的关键技术难点,为提升高速齿轮箱综合性能提供理论与技术支撑。

## 1 高速齿轮箱的工作特性与设计要求

### 1.1 高速齿轮箱的核心工作特性

高速齿轮箱在运行过程中核心工作特性集中体现为动态载荷复杂、热效应显著及传动稳定性要求严苛。高速工况下,齿轮啮合产生的交变载荷易引发轴系振动,同时齿面相对滑动速度极高,导致摩擦热大量产生,若散热不及时会造成齿面温度骤升,影响材料性能与润滑效果。此外,高速传动对零部件的形位精度和表面质量敏感度极高,微小的制造或装配误差可能引发啮合冲击,加剧磨损并降低传动效率。高速旋转产生的离心力会对轴系、箱体等结构产生附加应力,需确保结构具备足够的刚性与强度以抵抗变形。

### 1.2 高速齿轮箱的关键设计要求

高速齿轮箱的设计需围绕可靠性、高效性、高精度及稳定性四大核心目标展开。在可靠性设计方面,需通过精准的力学计算优化结构参数,提升零部件抗疲劳、抗磨损能力,确保长期高速运行下的使用寿命。高效性设计要求优化齿轮啮合参数,降低传动损耗,同时匹配高效散热系统,控制工作温度在合理范围。高精度设计体现在对齿轮、轴系等核心零部件的形位公差、表面粗糙度的严格把控,减少啮合偏差与振动冲击。稳定性设计则需通过动力学分析优化结构布局,提升系统固有频

率,避免共振现象,同时合理选择润滑方式与润滑剂,保障高速啮合面的良好润滑状态,抑制振动与噪声<sup>[1]</sup>。

## 2 高速齿轮箱核心零部件设计

### 2.1 高速齿轮的参数优化设计

高速齿轮的参数优化设计需围绕高速传动稳定性、承载适配性核心目标,统筹各关键参数的匹配逻辑。

(1) 模数选取需平衡承载需求与高速特性,在满足基础载荷传递能力的前提下,优先采用较小模数设计,以减少齿面啮合冲击幅值,降低齿轮旋转惯性,提升高速运行响应效率;同时需结合材料力学性能与热处理水平,精准核算模数与齿厚的适配关系,避免因模数过小导致齿根弯曲强度储备不足。(2) 齿数设计需兼顾传动比精度与啮合平稳性,合理增加齿数可提高啮合重合度,分散单齿受力载荷,缓解啮合振动;需控制齿数上限,避免齿轮直径过大导致轴系支撑跨度增加,进而影响轴系刚性;通过齿数搭配优化,规避啮合频率与系统固有频率的耦合风险,减少共振隐患。(3) 螺旋角优化需聚焦啮合性能提升,适当增大螺旋角可提升重合度与承载能力,改善啮合平稳性,但需严格控制角度范围,避免产生过大轴向力增加轴承负荷;结合齿轮布置形式,采用左旋与右旋齿轮组合设计,平衡轴向力,保障轴系运行稳定性。(4) 齿顶高系数与变位系数设计需适配高速传动需求,优化齿廓曲线形态,减少齿顶干涉现象,提升齿面接触精度;通过合理变位调整齿厚分布,增强齿根强度,同时改善齿面润滑接触条件,降低高速啮合时的摩擦损耗与温升。

### 2.2 高速轴系的结构设计与刚度匹配

高速轴系设计以结构合理性与刚度精准匹配为核心,兼顾回转精度与轻量化需求,保障高速运行稳定性。(1) 轴结构设计需简化整体布局,减少阶梯数量,规避截面突变引发的应力集中;合理设计轴肩与过渡圆

角,提升轴的抗疲劳性能;关键配合部位采用高精度公差标注,严格控制尺寸偏差,保障与齿轮、轴承的装配精度,减少高速旋转时的偏心振动。(2)轴刚度优化需从材料选型与截面尺寸设计双维度入手,优先选用高强度合金材料提升轴的自身刚度;通过增大轴的直径、优化轴系支撑跨度等方式,降低轴在高速旋转时的挠度变形;针对长轴结构,可增设中间支撑结构增强整体刚度,避免轴体变形导致齿轮啮合偏移。(3)轴承选型需适配高速运行特性,优先选用高速性能优良的轴承类型,保障轴承在高速工况下的润滑有效性与散热效率;通过背对背、面对面等差异化布置方式合理分配载荷,提升轴系的径向与轴向刚度;合理控制轴承间距,平衡轴系刚性与旋转惯性,优化高速运行动态性能。(4)轴系刚度匹配需实现各部件协同适配,确保齿轮、轴、轴承的刚度特性相互匹配,避免单一部件刚度不足导致系统振动放大;借助动力学仿真分析工具,验证轴系在高速工况下的刚度表现,迭代优化结构参数,提升轴系整体运行稳定性。

### 2.3 箱体的轻量化与刚性设计

箱体作为高速齿轮箱的基础支撑部件,需在实现轻量化的同时保障足够刚性,为内部零部件运行提供稳定环境。(1)材料选型需平衡轻量化与刚性需求,优先选用高强度铝合金、铸钢等材料,在满足结构强度要求的前提下降低箱体重量,减少整机能耗与安装负荷;针对重载高速工况,可选用铸钢材料并配合针对性热处理工艺,提升材料力学性能与刚性储备。(2)结构优化采用拓扑优化设计方法,精准识别非关键受力区域,去除冗余材料;在轴承座、安装面等关键受力部位增设加强筋结构,提升局部刚性;合理规划箱体内部腔室布局,减少结构应力集中,同时为齿轮、轴系等部件预留充足的安装空间与散热通道。(3)刚性保障需聚焦关键支撑部位,轴承座孔采用高精度加工工艺,严格控制孔的圆度、圆柱度与同轴度误差,提升轴承安装精度与支撑刚性;增大箱体底部与安装面的接触面积,通过合理的螺栓布置与预紧力控制,增强箱体安装稳定性,减少高速运行时的箱体振动。(4)轻量化与刚性的平衡需通过仿真验证迭代优化,利用有限元分析软件模拟高速工况下箱体的应力分布与变形情况,精准调整结构参数,在控制箱体重量的同时,将最大变形量限制在允许范围内,避免因箱体变形影响内部零部件的正常啮合与运行精度<sup>[2]</sup>。

## 3 高速齿轮箱制造材料的选择与性能优化

### 3.1 高速齿轮箱核心材料的性能要求

高速齿轮箱核心材料需满足高速工况下的综合性能

需求。(1)具备优异的力学强度与韧性,能承受交变载荷与冲击作用,避免疲劳失效;(2)拥有良好的耐磨性与抗咬合性,适配高速啮合时的齿面摩擦环境;(3)具备较高的硬度与尺寸稳定性,减少高速运行中的变形;(4)拥有良好的可加工性与热处理工艺性,便于精准制造与性能调控。

### 3.2 常用材料的选型对比

不同材料在性能与适用性上存在差异,需针对性选型。(1)合金结构钢强度与韧性均衡,可加工性好,适用于中等载荷的高速轴系与箱体部件;(2)渗碳钢表面硬度高、心部韧性强,耐磨与抗疲劳性能优异,是高速齿轮的优选材料;(3)高强度铝合金密度低、轻量化效果显著,导热性好,但承载能力有限,适用于轻载高速箱体或非关键部件;(4)铸钢刚性与承载能力强,抗变形性能好,但重量较大,适用于重载高速箱体。

### 3.3 材料热处理工艺对性能的提升优化

合理的热处理工艺可精准提升材料性能。(1)渗碳淬火工艺能显著提高材料表面硬度与耐磨性,同时保证心部韧性,适配高速齿轮需求;(2)调质处理可优化材料的强度与韧性匹配,提升轴系部件的综合力学性能;(3)时效处理能消除材料内应力,提升尺寸稳定性,减少加工与运行中的变形;(4)表面氮化处理可增强材料表面硬度与抗腐蚀性,延长零部件使用寿命,适用于特定工况下的核心部件<sup>[3]</sup>。

## 4 高速齿轮箱精密制造与装配工艺

### 4.1 高速齿轮箱核心零部件的精密制造工艺

高速齿轮箱核心零部件的精密制造工艺主要包含以下方面:(1)高速齿轮的精密切削与磨削工艺:精密切削阶段需优化刀具选型与切削参数,采用硬质合金或立方氮化硼刀具减少切削变形,控制切削速度、进给量与背吃刀量的匹配关系,提升齿廓初始精度;切削过程中需加强冷却润滑,避免切削热导致齿面烧伤或尺寸偏差。磨削工艺作为提升齿轮精度的关键环节,需采用高精度成形磨削技术,精准控制砂轮修整参数,保障齿廓形状精度;采用多工序磨削流程,依次完成齿顶、齿根与齿面的磨削加工,逐步提升表面粗糙度;磨削后需进行去毛刺处理,消除齿面微观缺陷,同时通过磁力研磨等光整加工进一步优化齿面质量,降低高速啮合时的摩擦损耗。(2)高速轴系的精密加工与校直工艺:轴类零件的精密加工需优先保障基准面精度,采用两端中心孔定位的磨削工艺,提升轴颈的圆度、圆柱度与同轴度;关键配合面需采用超精密磨削技术,控制表面粗糙度与尺寸公差在高精度范围内。对于细长轴类零件,加工过

程中需采用中心架或跟刀架辅助支撑,减少切削振动与变形;加工完成后需进行时效处理,消除内应力,提升尺寸稳定性。校直工艺需采用精密校直设备,通过多点测量精准定位轴的弯曲部位,采用冷校直或热校直方式进行矫正,矫正后需再次进行精度检测,确保轴的直线度符合设计要求;校直完成后需进行去应力退火,避免后续使用过程中产生二次变形。(3)箱体的精密铸造与加工工艺优化:精密铸造阶段需采用消失模铸造或熔模铸造技术,提升铸件的成形精度与内部质量,减少气孔、砂眼等铸造缺陷;铸造过程中需控制浇注温度、浇注速度与冷却速度,优化铸件的金属组织,提升材料力学性能。加工工艺优化需合理规划加工流程,先完成基准面加工,再以基准面为定位基准加工轴承座孔等关键部位;轴承座孔采用镗削、铰削或磨削等多道工序加工,保障孔的尺寸精度与形位公差;箱体连接面需采用铣削加工,控制平面度与表面粗糙度,确保装配贴合度;加工过程中需采用在线检测技术,实时监控加工精度,及时调整加工参数,避免累积误差。

#### 4.2 高速齿轮箱的装配工艺与精度控制

高速齿轮箱的装配工艺与精度控制要通过科学的流程设计与精准的精度控制,确保各零部件协同工作。

(1)高速齿轮箱的装配流程设计:装配流程需遵循“基准先行、由内向外、先静后动”的原则,先完成箱体内部清洁与预处理,去除加工残留的铁屑、杂质与毛刺;随后进行轴承与轴系的装配,将轴承精准压装至轴颈与轴承座孔,确保轴承安装到位且转动灵活;接着进行齿轮与轴的装配,采用热装或冷装方式实现过盈配合,保障连接可靠性;完成内部零部件装配后,进行箱体合箱装配,确保合箱面贴合紧密,螺栓紧固均匀;最后进行润滑系统、密封系统的装配,完成整机装配后进行初步调试。装配过程中需合理规划各工序的先后顺序,避免交叉作业导致零部件损伤或装配误差累积。(2)关键装配环节的精度控制方法:轴承装配精度控制需采用专用压装工具,控制压装力与压装速度,避免轴承损伤;通过百分表或千分表检测轴承端跳与径跳,确保符合精度

要求。齿轮装配精度控制需检测齿轮的安装相位与啮合间隙,采用塞尺或百分表测量啮合间隙,通过调整垫片厚度等方式优化啮合状态;检测齿轮的齿面接触斑点,确保接触斑点分布均匀、面积符合要求。箱体合箱精度控制需检测合箱面的平面度与贴合间隙,采用密封胶或密封垫保障密封性能;螺栓紧固需采用力矩扳手,按照规定的力矩与顺序分次紧固,避免箱体变形。轴系回转精度控制需采用百分表检测轴的径向圆跳动与轴向窜动,确保回转精度符合设计要求。(3)装配误差对高速传动性能的影响分析:轴承装配误差会导致轴系回转精度下降,增加高速运行时的振动与噪声,加剧轴承磨损,缩短使用寿命。齿轮啮合间隙过大或过小会影响传动平稳性,间隙过大易产生冲击载荷,间隙过小则会因齿面摩擦加剧导致温升过高。箱体合箱误差会导致轴承座孔同轴度偏差,使轴系受力不均,引发振动与噪声。装配过程中的累积误差会导致齿轮与轴的中心线不重合,产生附加弯矩,加剧齿面磨损与疲劳失效,降低传动效率<sup>[4]</sup>。

结束语:本文系统完成了高速齿轮箱设计与制造的关键技术研究,明确了高速齿轮箱的工作特性与设计要 求,形成了涵盖核心零部件设计、制造材料优化、精密制造与装配工艺的完整技术体系。通过多环节协同优化,有效提升了高速齿轮箱的可靠性与稳定性。未来研究可聚焦智能化设计与制造技术融合,结合大数据与仿真分析进一步优化参数匹配。

#### 参考文献

- [1]朱志超.基于数字孪生的高速重载齿轮箱设计研究[D].浙江:宁波大学,2022(01):13-14.
- [2]郝继鹏.提高齿轮箱扭矩密度的设计制造方法.建筑技术科学,2023(01):11-12.
- [3]徐衍杰.高速试验齿轮箱喷油润滑仿真及优化研究[D].重庆:重庆大学,2024(02):16-17.
- [4]陈东,万文铭.提高齿轮箱扭矩密度的设计制造方法[J].智能制造,2022(4):95-98.