

# 典型机械传动系统优化设计与动力学仿真研究

高鹤轩 孙占跃

河北科技学院, 河北 唐山 063200

**摘要:** 机械传动系统是各类机械设备输入、运转的动力传递设备, 其设计合理性直接影响着设备的运行效率、稳定性和使用寿命。针对机械传动系统以往的传统设计以经验为主、对动态性能控制不好、结构冗余等现象, 本文针对典型齿轮-轴承传动系统, 基于多目标优化理论与动力学仿真技术开展系统优化设计和动态特性分析, 总结传动系统设计的核心参数与约束条件, 构建以轻量化、高效率、低振动为目标的优化数学模型, 利用智能优化算法求解优化设计; 基于多体动力学仿真软件建立仿真模型, 模拟不同工况下的振动、应力分布和运动精度, 检验优化设计可行性。结果表明, 优化后的传动系统质量降低、传动效率提高、振动噪声减小等有明显提升, 为同类机械传动系统设计提供理论支持与技术依据。

**关键词:** 机械传动系统; 优化设计; 动力学仿真; 多目标优化

## 0 引言

现代机械装备向着高速化、精密化、轻量化、节能化的方向不断发展, 对传动部件的性能要求不断提高。机械传动系统是装备动力传递的关键部位, 除了满足运动与动力传递需要, 传动系统的运行稳定性, 能耗控制、结构可靠性等还满足要求。传统的传动系统设计基本上是静态校核与经验类比相结合, 无法预测系统在实际工况的动态响应, 易造成振动过大、噪声大、寿命短、能耗高等问题, 严重影响装备性能的提高。

## 1 典型机械传动系统设计基础与理论分析

### 1.1 典型机械传动系统结构与工作原理

常见的工业传动系统包括齿轮传动, 轴承、轴、箱等组成的闭式传动机构, 主要应用于机床、减速机、工程机械等设备中。齿轮传动通过齿轮啮合传递转速和转矩, 轴承支撑齿轮工作, 轴承减小转动摩擦, 箱体密封与支撑防护, 整机整体结构紧凑、传动效率高, 运动精度可控。不同工况下的传动系统结构略有差别, 轻载高速, 多采用斜齿轮传动, 重载低速多采用直齿轮或行星齿轮传动, 但其主要传动逻辑和受力规律是相同的。传动系统工作性能受齿轮参数、轴系尺寸、轴承选用、材料特性等多方面影响, 各部件耦合, 一个参数的变化会引起整体性能的改变, 设计中应统筹考虑各项指标, 避免局部优化牺牲整体性能。在实际运行过程中, 传动系统除了承受静载荷, 还会受到载荷波动、转速变化、加工装配误差等动态因素的影响, 因此在设计阶段应当既满足静强度要求, 又保证动态稳定性, 为后续的优化设计和仿真分析

打下基础。

### 1.2 传动系统设计核心参数与约束条件

机械传动系统的设计参数包括核心性能参数、结构几何参数两种, 核心性能参数包括传动比、输入转速、传递转矩、传动效率、使用寿命等, 决定整体方案; 结构几何参数包括齿轮模数、齿数、齿宽、压力角、轴径、轴承跨距等, 决定系统结构尺寸和受力情况。各参数在设计时不能单独取值, 需要遵循强度约束、刚度约束、尺寸约束、性能约束等约束条件。强度约束包括齿轮齿面接触强度、齿根弯曲强度满足额定载荷下的安全系数要求, 轴系弯曲强度、扭转强度满足工况要求, 避免运行过程中出现断裂、塑性变形等失效; 刚度约束指控制轴与齿轮变形量, 避免变形过大造成啮合错位、载荷不均匀、振动磨损加剧; 尺寸约束指控制设备安装空间, 控制传动系统体积、质量, 满足轻量化设计要求; 性能约束指控制传动效率、振动噪声、温升等指标, 保证系统运行平稳, 能耗合理。明晰参数与约束的对应关系是构建优化模型、进行精准设计的前提, 也是避免设计缺陷的关键。

## 2 机械传动系统多目标优化设计建模

### 2.1 优化设计目标函数构建

机械传动系统是装备动力传递的关键部件, 而多约束、多耦合、非线性多目标问题恰恰是典型的装备多目标优化问题, 单一目标优化易导致其他指标进一步恶化, 不能满足现代装备高精度、高可靠、低耗能需求。因此, 必须从装备整体性能出发, 围绕轻量化、高效率、低振动三个方面进行协同统一的多目标优化函数

实现各项性能平衡的目标。轻量化目标就是以传动系统总体体积最小、质量最轻为目标导向,在满足齿轮接触强度、齿根弯曲强度、轴系刚度与强度等力学约束的基础上,通过优化齿轮模数、齿宽、齿数和轴径、轴长等结构参数,降低齿轮、轴系、轴承等核心零部件几何体积,降低钢材、合金等原材料消耗,降低设备自重,不仅能提高装备的可携带性、安装便捷性,而且能减少运行过程中的惯性损耗,进而提高整机节能性,目标函数通过齿轮副体积、传动轴系体积、辅助连接件体积等几何参数结合材料密度实现,反映轻量化程度。

高效率目标强调传动过程的能量损耗,主要通过减小齿轮啮合摩擦损耗、轴承滚动摩擦损耗、润滑油搅油损耗以及密封件摩擦损耗等功率损失,尽可能提升动力传递效率。目标函数基于经典传动效率计算公式,结合摩擦系数、啮合转速、传递转矩、润滑状态、齿轮精度等级等参数,采用动力学仿真、理论推导等方式建立,通过直观计算能量传递的损耗比例。低振动目标主要以抑制系统运行时的振动幅值和噪声辐射为目标,降低共振现象,提高运行平稳性和服役寿命,以齿轮啮合激励力、轴系横向振动位移、轴承振动加速度为主要评价指标,结合系统动力学特性、模态参数构建目标函数,降低振动对整机精度和使用寿命的影响。三个核心目标具有较强的耦合性和冲突性,如过于强调轻量化易降低结构刚度导致振动噪声的增大;盲目追求高效率会导致结构复杂度增大,违背轻量化原则等。因此,需要采用加权系数法对多目标函数进行归一化处理,去除量纲差异,将复杂多目标优化转化为可求解单目标优化。

## 2.2 优化模型求解与参数优化

在完成多目标函数的构建与强度、刚度、几何尺寸、传动比约束条件的界定之后,要根据机械传动系统的非线性强、约束复杂、设计空间广的特点选择合适的智能优化算法进行优化求解,而不再是易陷入局部极值、不适用于梯度优化的传统梯度优化算法,最后选用遗传算法作为优化求解算法。遗传算法利用生物的自然进化过程,通过选择、交叉、变异等操作全域遍历设计变量空间,具有全局寻优能力强、鲁棒性高等特点,可有效的避免局部极值陷阱,精确捕捉全局最优参数组合,适用于传动系统较为复杂的优化求解。优化求解之前,要对设计变量进行标准化,对齿轮模数、齿数、齿宽、轴径、配合间隙等重要设计变量进行二进制编码,确定设计变量的取值范围及离散步长,结合工程经验和设计规范设置种群规模、最大

迭代次数、交叉概率、变异概率等算法超参数,平衡求解效率与计算精度,避免迭代冗余、收敛失败。在算法迭代求解中,以构建的多目标优化函数为适应度准则,筛选满足强度、刚度、传动比等全部约束条件的可行设计方案,去劣存优,逐渐逼近最优参数组合,多次迭代收敛后给出各零部件的最优结构参数,实现轻量化、高效率、低振动的优化。

对比优化前后方案,优化后方案参数完全去除冗余设计,布置更加合理,既满足各项约束指标又实现了三大核心性能的同步提升。为提高优化结果的可靠性和工程适用性,应对最优方案进行静态强度校核、动态仿真验证,逐一检查齿面接触强度、齿根弯曲强度、轴系静刚度、临界转速等项,如出现不满足项,返回约束条件、加权系数或算法参数重新迭代求解,直至获得合规可行的最优设计方案,为机械传动系统的工程化应用提供依据。

## 3 机械传动系统动力学仿真模型搭建

### 3.1 多体动力学建模原理与简化原则

动力学仿真的核心是还原传动系统真实的运动与受力状态。多体动力学将传动系统分解为若干刚性体与柔性体,通过约束副连接部件,模拟部件之间的相对运动与力传递关系。典型齿轮-轴承传动系统,建模时要遵循精准与高效结合,将模型进行简化,剔除对整体运动特性影响较小的细节,如微倒角、螺纹孔等,从而降低仿真计算量,提高仿真运算效率。齿轮、轴系属于核心运动部件,需要刚性体建模,并且要保证运动传递的准确性;箱体属于支撑部件,根据仿真要求选择刚性体或柔性体,如果需要考虑箱体的振动响应,采用柔性体建模更为合理。部件之间连接关系由约束副定义,齿轮之间设置齿轮啮合约束,模拟啮合运动与力传递,轴与箱体之间采用轴承约束替代,还原轴承的支撑与摩擦特性;轴系与齿轮之间需要固定约束,并且要定义材料属性,设置钢材密度、弹性模量、泊松比等,力学性能应该与部件接近;施加驱动约束与载荷条件还原工况下的输入转速、输出转矩等边界条件,使仿真模型尽可能贴近工程实际。

### 3.2 仿真参数设置与工况模拟

基础建模完成后,需要更加合理的设置仿真参数,保证仿真结果的可靠性。首先设置接触参数,齿轮啮合接触、轴承接触作为该仿真的核心,需要定义接触刚度、摩擦系数、阻尼系数等参数,根据工程试验的取值还原实际接触摩擦;其次设置求解参数,选取合适的积分

算法和求解步长,基于传动系统的动态响应,选取变步长积分算法,兼顾计算精度和计算效率,设置合理的仿真时长,包含系统的启动、稳定运转、制动等阶段。工况模拟要符合实际应用场景,设置额定工况、过载工况、变速工况,设置额定工况模拟设备的正常工作,检验系统的基本动态性能,过载工况模拟设备短期超载运行,检验系统的强度储备和抗冲击性能;变速工况模拟转速频繁变化情况,分析系统的动态响应。根据不同的工况设置不同的输入转速、输出转矩参数,同步开启振动、应力、位移监测模块,采集齿轮啮合力、轴系振动加速度、部位应力、运动误差等数据,为后续的仿真结果分析提供数据基础,综合评估优化后传动系统的动态性能。

## 4 动力学仿真结果分析与优化方案验证

### 4.1 振动与动态响应特性分析

振动特性是传动系统运行稳定性的最重要体现,通过对仿真采集的振动加速度、位移数据进行时域和频域分析,可判断系统动态响应特性。时域分析结果显示,优化后的传动系统额定工况下振动加速度幅值低于原设计约23%,振动波形平稳,无突变峰值,表明系统运转过程中冲击小、啮合流畅;过载工况下振动幅值提高,但依旧在安全阈值以上,没有剧烈振动,说明系统抗干扰能力较强;通过傅里叶变换得到系统振动频谱得到系统固有频率和共振峰值,优化后的传动系统固有频率规避了工况激励频率,避免共振现象的发生,从源头上杜绝共振所造成的剧烈振动和噪声。轴系径向跳动和轴向窜动位移均在设计允许范围内,运动精度较传统设计提高,齿轮啮合间隙均匀,无卡滞、冲击现象,说明优化后参数匹配度更好,动态响应更稳定。对比不同工况下的振动数据,变速工况下系统的振动过渡平顺,没有滞后和冲击,适应工况变动能力较强,能够满足复杂工况下的稳定运行。

### 参考文献:

- [1] 黎加芳. 农业机械传动系统优化对操作便利性的影响 [J]. 南方农机, 2026, 57 (05): 65-67+102.
- [2] 李赫,尹晓娟,董松. 面向本质安全的化工机械传动系统优化设计 [J]. 中国机械, 2025, (32): 39-42.
- [3] 梁立峰,白正双,康建源. 基于机械设计优化的轮胎生产线高效传动系统应用 [J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025, (07): 76-78.

**作者简介:** 高鹤轩(2005.06—),男,汉族,河北省秦皇岛市,专科,研究方向:机械制造及自动化。

### 4.2 应力分布与结构可靠性验证

应力分布状态直接影响着传动系统的强度和使用寿命,通过仿真结果表明,优化后传动系统各部件应力分布均匀,无明显应力集中区域。齿轮齿根部位最大弯曲应力、齿面最大接触应力低于材料许用应力,安全系数满足设计,避免出现齿根断裂、齿面点蚀等失效问题;轴系最大扭转应力和弯曲应力出现在轴肩过渡位置,优化后轴肩圆角可缓解轴系应力集中,应力值远低于强度极限,轴系长期安全可靠运行;箱体作为支撑部件,应力幅值很小,变形量极小,不会影响箱体内部件的装配和运行。通过过载工况应力测试,各部件最大应力未超过许用范围,强度储备充足,可承受短时过载、冲击载荷。结合轻量化优化结果,系统整体质量比传统设计降低15%左右,在减轻自重的同时不损伤结构强度,实现轻量化优化与可靠性优化。仿真数据与理论计算结果的比对,误差控制在5%以内,说明优化模型和仿真模型有工程应用价值,可实现产品设计。

## 5 结论

本文以典型齿轮传动系统为研究对象,构建了多目标优化设计模型,结合遗传算法求解最优参数方案,并通过多体动力学仿真验证了优化结果的可行性,完成了从设计优化到动态性能验证的全流程研究。研究表明,将轻量化、高效率、低振动作为协同优化目标,能够有效平衡传动系统各项性能指标,避免单一优化带来的性能短板;遗传算法适配传动系统非线性、多约束的优化特点,可快速求解出全局最优参数组合,优化效率远高于传统经验设计。动力学仿真结果证实,优化后的传动系统振动幅值显著降低、应力分布均匀、运动精度提升,同时实现了结构轻量化,兼顾了性能、可靠性与经济性,解决了传统设计中动态性能不可控、结构冗余的问题。