

# 机械传动系统动力学仿真与结构参数优化设计

朱冬伟

浙江欣兴工具股份有限公司 浙江嘉兴 314000

**摘要：**在现代工业领域，机械传动系统作为机械设备的核心组成部分，其性能直接影响设备的运行效率、稳定性和可靠性。动力学仿真与结构参数优化设计是提升机械传动系统性能的重要手段。本文深入阐述机械传动系统动力学仿真的理论基础与常用方法，详细介绍结构参数优化设计的策略，通过典型案例展示两者结合在实际工程中的应用效果，分析当前面临的挑战，并对未来发展趋势进行展望。研究表明，动力学仿真与结构参数优化设计的有机结合，能够有效提高机械传动系统的综合性能，降低研发成本，缩短产品开发周期，对推动机械传动技术的发展具有重要意义。

**关键词：**机械；传动系统；参数优化

## 引言

机械传动系统广泛应用于汽车、航空航天、机床、工程机械等众多领域，承担着传递动力、改变运动形式和参数的重要功能。随着工业技术的不断进步，机械设备向高速化、高精度化、重载化方向发展，对机械传动系统的性能提出了更高要求。传统的机械传动系统设计主要依赖经验和试错法，通过反复的物理试验和修改来优化设计，这种方式不仅研发周期长、成本高，而且难以全面考虑系统在复杂工况下的动态特性，导致设计结果难以满足现代工业的需求。动力学仿真技术能够在虚拟环境中模拟机械传动系统的动态行为，分析系统在不同工况下的受力、振动、运动等特性，为设计人员提供直观的动态性能评估。结构参数优化设计则通过数学优化算法，在满足设计约束条件下，寻找使系统性能最优的结构参数组合。将动力学仿真与结构参数优化设计相结合，能够在设计阶段全面了解机械传动系统的动态性能，提前发现潜在问题，并通过优化结构参数进行改进，从而提高设计质量和效率，降低产品开发成本和风险。因此，开展机械传动系统动力学仿真与结构参数优化设计研究具有重要的理论价值和实际应用意义。

## 一、机械传动系统动力学仿真实理论与方法

### （一）动力学基本理论

机械传动系统动力学主要基于牛顿运动定律、达朗贝尔原理、拉格朗日方程等经典力学理论。牛顿运动定律描述了物体在力的作用下的运动状态变化，是分析机械系统动力学行为的基础；达朗贝尔原理通过引入惯性

力，将动力学问题转化为静力学问题进行求解，简化了动力学方程的建立；拉格朗日方程则从能量的角度出发，以系统的动能和势能为基础，建立系统的动力学方程，适用于多自由度、复杂约束条件的机械系统分析<sup>[1]</sup>。在机械传动系统中，各构件之间存在多种力的作用，如摩擦力、惯性力、弹性力等，同时还伴随着运动副的约束关系。通过对这些力和约束的分析，结合动力学基本理论，可以建立机械传动系统的动力学方程，描述系统的动态行为。

### （二）常用动力学仿真方法

#### 1. 多体系统动力学仿真

将机械传动系统视为由多个刚体或柔性体组成的多体系统，通过建立各体之间的运动副约束关系和力的传递模型，求解系统的动力学方程。多体系统动力学仿真软件，如ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems)，能够直观地模拟机械系统的运动过程，分析构件的位移、速度、加速度以及受力情况。在齿轮传动系统仿真中，可通过ADAMS建立齿轮副的接触模型，研究齿轮在啮合过程中的动态载荷分布、振动特性等<sup>[2]</sup>。

#### 2. 有限元动力学仿真

基于有限元理论，将机械传动系统的构件离散为有限个单元，通过求解单元的动力学方程，得到整个系统的动态响应。有限元动力学仿真软件，如ANSYS Mechanical，不仅可以分析构件的应力、应变分布，还能进行模态分析、谐响应分析、瞬态动力学分析等，研究系统的振动特性和动力响应。对于轴类零件，可利用

ANSYS进行模态分析,确定其固有频率和振型,避免在工作过程中发生共振。

### 3. 计算流体动力学(CFD)与动力学耦合仿真

在一些涉及流体作用的机械传动系统中,如液力传动系统,需要考虑流体与固体之间的相互作用。计算流体动力学与动力学耦合仿真方法,通过将CFD软件(如Fluent)与多体动力学或有限元软件相结合,实现流固耦合分析。在液力变矩器仿真中,利用CFD分析流体的流动特性,再将流体作用力传递到固体构件上,通过动力学仿真研究构件的动态响应,从而全面了解液力变矩器的工作性能。

## 二、机械传动系统结构参数优化设计策略

### (一) 优化设计数学模型构建

机械传动系统结构参数优化设计的核心在于构建科学合理的优化设计数学模型,其由目标函数、设计变量和约束条件三大关键要素构成,三者相互关联、共同作用,形成一个有机整体,直接决定了优化设计的方向与最终效果。目标函数作为衡量设计方案优劣的量化指标,需紧密围绕机械传动系统的核心性能需求进行设定<sup>[3]</sup>。在新能源汽车传动系统设计中,为契合节能环保的发展趋势,常将传动系统的综合效率最大化设为目标函数。这不仅能够有效降低车辆运行过程中的能量损耗,延长续航里程,还能减少能源消耗和尾气排放,提升产品的市场竞争力。而在航空航天领域的精密传动装置设计时,鉴于对设备运行稳定性和可靠性的严苛要求,多以系统振动最小化作为目标函数,通过减少振动,可降低因部件磨损和疲劳引发的故障风险,保障航空航天设备在复杂工况下的安全稳定运行。设计变量的选取需全面涵盖对机械传动系统性能有显著影响的结构参数。以常见的齿轮传动系统为例,齿轮的模数、齿数、齿宽、压力角、螺旋角等参数,以及轴的直径、长度、材料属性,轴承的型号、尺寸、精度等级等,均属于设计变量范畴。这些参数的细微变化,都会对齿轮传动系统的承载能力、传动效率、振动噪声等性能产生重要影响。在实际优化设计中,设计变量的数量和范围需根据具体设计需求和系统复杂程度进行精准界定,过多的设计变量会增加优化问题的复杂度和计算量,而过少则可能无法充分挖掘系统的优化潜力。约束条件是对设计变量的限制与规范,旨在确保优化结果既满足性能要求,又具备工程可行性。性能约束方面,需保证机械传动系统在强度、刚度、疲劳寿命、振动频率等关键性能指标上达到设计标准。例如,轴类零件在工作过程中承受着复杂的载荷,必须满

足强度和刚度要求,以避免发生断裂或过度变形;同时,为防止系统发生共振,需将其固有振动频率控制在一定范围内。几何约束主要涉及各零部件的尺寸限制、空间位置关系以及装配间隙要求等。在设计紧凑的机械传动装置时,需严格控制各部件的尺寸和布局,确保它们在有限的空间内能够正常安装和协同工作。工艺约束则着重考虑加工制造工艺的可行性和经济性,包括加工精度、表面粗糙度、热处理工艺、装配工艺等要求。

### (二) 优化算法应用

在机械传动系统结构参数优化设计中,优化算法的选择与应用至关重要,其直接决定了能否高效、准确地找到最优设计方案。目前,常用的优化算法主要分为传统优化算法和智能优化算法两大类,它们各自具有独特的优势和适用场景。传统优化算法中的梯度法和牛顿法,基于目标函数的梯度信息进行搜索,适用于目标函数可微且具有明确数学表达式的情况。以简单的机械零件尺寸优化问题为例,若目标函数为零件重量最小化,且重量与零件尺寸呈可微的函数关系,此时采用梯度法或牛顿法,通过不断计算目标函数的梯度方向,逐步调整设计变量,可快速逼近最优解<sup>[4]</sup>。然而,这两种算法对初始值的选取较为敏感,若初始值选择不当,极易陷入局部最优解,无法找到全局最优方案,在处理复杂的机械传动系统优化问题时存在一定局限性。遗传算法模拟生物进化过程中的自然选择、遗传和变异机制,通过选择、交叉、变异等操作在解空间中搜索最优解。在设计大型复杂的齿轮传动系统时,遗传算法能够同时处理多个设计变量,无需目标函数可微,具有强大的全局搜索能力,即使在目标函数复杂、解空间庞大且不连续的情况下,也能有效搜索到较优解。但遗传算法的计算效率相对较低,需要进行大量的迭代计算,且参数设置对算法性能影响较大,如交叉概率、变异概率等参数的选择不当,可能导致算法收敛速度慢或陷入局部最优。

粒子群优化算法通过模拟鸟群觅食行为,使粒子在解空间中不断调整位置,以寻找最优解。该算法具有算法结构简单、参数少、收敛速度快等优点,在处理一些中低维度的机械传动系统优化问题时表现出色,如简单轴系结构参数优化。但在面对高维度、多峰值的复杂优化问题时,粒子群优化算法容易出现早熟收敛现象,即粒子过早地聚集在局部最优解附近,无法继续搜索全局最优解。

### (三) 优化设计流程

机械传动系统结构参数优化设计是一个系统性、迭

代性的过程，科学合理的设计流程是确保获得最优设计方案的关键。其流程主要包括明确设计目标与收集资料、构建优化设计数学模型、选择优化算法求解以及优化结果分析与验证四个主要阶段，各阶段紧密相连、环环相扣。在明确设计目标与收集资料阶段，设计人员需与客户或相关部门进行充分沟通，深入了解机械传动系统的应用场景、性能要求、使用环境等关键信息，从而精准确定设计目标。例如，为矿山机械设备设计传动系统时，需明确设备的工作载荷、运行速度、工作时间等要求，将传动系统的承载能力和可靠性作为首要设计目标。同时，广泛收集与设计相关的资料，包括行业标准、设计规范、类似产品的设计经验、材料性能参数、加工工艺信息等，为后续的设计工作提供全面的参考依据。

### 三、面临的挑战与发展趋势

#### (一) 面临的挑战

##### 1. 模型精度与计算效率的平衡

为了提高动力学仿真模型的精度，需要考虑更多的因素和细节，如构件的弹性变形、接触非线性、摩擦磨损等，但这会导致模型复杂度增加，计算时间大幅延长。如何在保证模型精度的前提下，提高计算效率，是动力学仿真面临的一个重要挑战。

##### 2. 多学科耦合问题

现代机械传动系统往往涉及机械、力学、热学、流体力学等多个学科领域，各学科之间存在复杂的耦合关系。在动力学仿真和结构参数优化设计中，准确考虑多学科耦合效应，建立多学科耦合模型，对设计人员的知识储备和技术能力提出了更高要求。

##### 3. 优化算法的局限性

虽然现有优化算法在机械传动系统结构参数优化设计中取得了一定成果，但仍存在一些局限性。如传统优化算法容易陷入局部最优解，智能优化算法计算效率较低、参数设置复杂等。如何开发更高效、可靠的优化算法，提高优化设计的质量和效率，是亟待解决的问题。

#### (二) 发展趋势

随着科技的持续创新，机械传动系统动力学仿真与结构参数优化设计将朝着多维度深度发展。在仿真技术层面，伴随计算机性能提升与仿真软件迭代升级，多物理场耦合仿真技术将愈发成熟，通过有机整合机械、热、流体、电磁等多物理场效应，能够更为逼真地还原机械传动系统在复杂工况下的实际运行状态，为设计决

策提供更精准可靠的依据；于优化设计领域，人工智能技术的深度融合成为关键趋势，机器学习算法凭借对海量设计数据的高效学习与分析能力，可自动生成创新性的优化设计方案，深度学习算法则通过对优化算法参数的智能调优，显著提升优化算法的性能表现，共同推动结构参数优化设计迈向智能化新阶段；在设计模式革新方面，云计算技术构建的云平台为行业带来全新变革，支持设计人员突破地域限制，实现远程协同设计，不仅能便捷共享计算资源与设计数据，大幅提升设计效率与团队协作性，还可依托云平台庞大的存储能力，积累并利用海量设计案例与数据资源，为设计创新提供丰富的参考借鉴，全方位推动机械传动系统设计技术的跨越式发展。

#### 结论

机械传动系统动力学仿真与结构参数优化设计是提升机械传动系统性能的重要手段。本文通过对动力学仿真理论与方法、结构参数优化设计策略的阐述，结合实际案例展示了两者的应用效果。研究表明，动力学仿真与结构参数优化设计的有机结合，能够在设计阶段全面评估机械传动系统的动态性能，优化系统结构参数，提高设计质量和效率，降低研发成本和风险。尽管目前在模型精度与计算效率平衡、多学科耦合、优化算法等方面面临挑战，但随着多物理场耦合仿真技术、智能化优化设计、基于云平台的协同设计等技术的发展，机械传动系统动力学仿真与结构参数优化设计将迎来更广阔的发展前景，为机械传动技术的进步和工业领域的发展提供强大支持。

#### 参考文献

- [1] 莫帅, 刘文斌, 王震, 等. 新能源汽车机电耦合传动系统非线性故障动力学[J/OL]. 振动工程学报, 1-12[2025-06-25].
- [2] 王琪. 人字行星齿轮传动系统多故障动力学虚拟仿真与关联性分析[D]. 郑州轻工业大学, 2024.
- [3] 姜春雷, 樊智敏, 姜宇, 等. 考虑磨损故障的双渐开线齿轮传动系统动态特性研究[J]. 机电工程, 2024, 41(05): 775-785.
- [4] 王文豪. 永磁半直驱刮板输送机传动系统动力学研究[D]. 中国矿业大学, 2023.