

基于多体动力学的高速行星齿轮箱振动传递路径分析与低噪声结构优化

马茂生

南京高精齿轮集团有限公司

摘要: 本文聚焦高速行星齿轮箱运行时的振动与噪声问题,从多体动力学的角度展开研究。首先梳理多体系统动力学的基础内容,搭建行星齿轮箱的动力学模型,对振动是如何在内部传递的进行理论层面的分析。接着对高速行星齿轮箱的实际工作过程做了详细说明,选用匹配的振动信号收集和处理办法,开展振动特性相关的实验。借助振动传递路径识别技术,分析影响振动传递的各类因素,进而给出对应的优化方向。同时结合低噪声设计的相关理论,采用合适的结构优化手段,对高速行星齿轮箱的结构进行低噪声设计与调整。这样做的目的是减少齿轮箱运行时的振动和发出的噪声,提高运行的平稳性与可靠性。

关键词: 多体动力学; 高速行星齿轮箱; 振动传递路径; 低噪声结构优化

一、多体动力学基础理论

1.1 多体系统动力学基本原理

多体系统动力学聚焦的是由多个刚体或柔体通过运动副连接形成的复杂机械系统的运动和受力情况。这门学科不是单一领域的知识,而是把经典力学、分析力学、连续介质力学和计算机技术等多个学科的内容整合到一起。它的核心工作是建立一套能描述系统里各个物体之间相互作用和运动规律的动力学方程。在实际分析过程中,研究人员会用到拉格朗日方程、牛顿-欧拉方程这类基础工具,再搭配数值计算的方法,来对系统的运动学和动力学特性做精确的计算和分析。像机械臂、航天器这类复杂的机械系统,都需要用这套方法来研究它们的运行状态。

1.2 行星齿轮箱动力学模型构建

行星齿轮箱动力学模型的搭建得结合它本身的结构特点和实际工作情况来做。

首先得把齿轮箱里各个零件的几何尺寸、重量分布还有连接方式都弄清楚,这样模型才能真实反映实际系统的物理特性。像齿轮的齿数、模数,还有轴承的安装位置这些细节,都得准确记录下来。然后用多体动力学的相关知识,给每个零件建立运动和受力的方程。这些方程要能描述齿轮之间的啮合情况、轴承对零件的支撑作用,还有箱体振动这些关键的动力学表现。比如齿轮啮合时的冲击力,轴承转动时的摩擦力,都得在方程里体现出来。另外,齿轮箱工作时会受到外面的力,比如电机给的扭矩、负载大小的变化,内部也会有齿轮啮合冲击、轴承摩擦这些力。把这些力都加到模型里,能让模型更准确、更可靠。最后用数值仿真的方法来计算和分析这个模型,得到齿轮箱振动的响应情况。这些结果可以

用来分析振动是怎么传递的,也能为优化结构降低噪声提供依据。像有的企业会根据这些仿真结果调整齿轮箱的箱体厚度,或者改变齿轮的材料,来减少振动和噪声。

1.3 振动传递路径理论分析

振动传递路径的理论分析,核心是搞清楚行星齿轮箱内部振动能量是怎么传播的。得先弄明白振动在齿轮、轴承、箱体这些零件之间的传递方式,比如零件直接接触时的振动传递,还有通过油液等流体连接时的振动传递。接着要建立振动传递矩阵模型,用这个模型算出不同传递路径对整体振动的影响程度,找出影响最大的关键路径,以及这些路径里容易受外界因素影响的参数。从结构振动的角度来看,结合模态分析的相关理论,还能研究振动在齿轮箱整体结构里的传播特点,以及振动能量在传播过程中减弱的规律。这些研究内容,能为之后优化振动传递路径提供理论上的支持。

二、高速行星齿轮箱振动特性分析

2.1 高速行星齿轮箱工作原理

高速行星齿轮箱的核心部件包括太阳轮、行星轮、内齿圈和行星架。这些部件相互配合,构成了整个传动系统的基础。动力传输的过程是这样的:输入轴先把动力传递给太阳轮,太阳轮转动时会带动与之啮合的行星轮。行星轮一方面会绕着自己的轴线自转,另一方面还会在行星架的支撑下绕着太阳轮公转。最终,动力通过行星架传递到输出轴,完成整个传动流程。从实际应用来看,这种结构让高速行星齿轮箱具备了不少优势。比如说传动比可以做得很大,能满足不同场景下的速度调节需求;同时整体结构比较紧凑,不会占用太多空间;而且它的承载能力也很强,在高速运转的情况下,依然能稳定高效地传递动力。

2.2 振动信号采集与处理方法

在振动信号采集环节，会用到高精度且灵敏度高的振动传感器。这些传感器需要布置在高速行星齿轮箱的关键位置，比如太阳轮、行星轮和行星架附近，这样才能准确获取各个部件的振动情况。同时，还得挑选合适的数据采集设备。这些设备要能实时、稳定地收集振动信号，不能出现信号丢失或失真的情况，毕竟后续分析都得靠这些信号。

处理振动信号时，第一步是给原始信号去噪。常用的方法有小波变换、经验模态分解等，这些方法能有效过滤掉信号里的干扰，让信号更清晰。去噪之后就要提取特征了。可以通过时域分析、频域分析，或者把时域和频域结合起来分析，找出能体现高速行星齿轮箱振动特点的关键参数，像振幅、频率、相位这些。这些参数会为之后的振动特性实验研究提供可靠的数据支持。

2.3 振动特性实验研究

振动特性实验研究选取实际应用中的高速行星齿轮箱作为研究对象，同时搭建了针对性的实验平台。实验开展期间，研究人员严格遵循预先制定的实验方案执行操作，通过调整齿轮箱的运行状态——比如改变设备的运转速度、施加不同大小的负载等方式，收集不同运行条件下的振动数据。实验采集到的振动数据会被逐一详细记录，之后借助此前介绍过的信号处理方法展开分析工作。研究人员将实验得到的结果与理论分析的结论放在一起比对验证，这样做能够对理论模型的准确程度和可靠程度做出判断。高速行星齿轮箱在不同工况下的振动特性规律也能通过这样的方式进一步被挖掘，像某些特定转速区间内振动幅值的变化特点，或者不同负载下振动频率的偏移情况，都可以在比对过程中被观察到。

三、振动传递路径识别与分析

3.1 振动传递路径识别技术

振动传递路径识别技术是解决高速行星齿轮箱振动问题的重要步骤。这项技术主要依托振动信号的传播特点，借助信号处理方法和系统辨识理论，来弄清楚齿轮箱内部各部件之间振动传递的具体关系。比如说，可以用模态分析技术找出齿轮箱本身的固有频率和振型，这样就能进一步分析振动能量在结构里是怎么传递的；另外，结合传递函数分析方法，还能算出不同路径对整体振动的影响程度，这能为之后控制振动、优化结构提供实际的参考。

在实际使用这项技术时，得先对高速行星齿轮箱做全面的模态测试，收集它在不同频率下的振动响应数据。这些数

据是后续识别模态参数的基础，能帮助准确确定齿轮箱的固有频率、阻尼比和振型等关键信息。然后，用一些先进的信号处理技术，像小波变换、经验模态分解等，对收集到的振动信号进行降噪和提取特征，这样能让信号质量更好，识别结果更准确。最后，结合系统辨识理论，建立齿轮箱振动传递路径的数学模型，通过分析模型和模拟计算，找出振动能量在齿轮箱内部传递的规律和关键路径。

3.2 振动传递路径影响因素分析

高速行星齿轮箱运行时，振动传递的路径会受到多方面因素的影响。比如说齿轮箱的结构设计细节，像齿轮的模数、齿数、齿宽，还有轴承的型号和安装位置，这些都会直接影响振动传递的特点。不同的结构参数会让振动能量在传递时出现减弱或增强的情况，进而改变传递路径的效率。另外，齿轮箱的制造精度和装配质量也很关键。如果制造时存在误差，或者装配过程不够规范，就可能导致齿轮啮合不顺畅、轴承间隙过大等问题，这些问题会引发额外的振动和噪声，影响振动传递路径的稳定性。

齿轮箱的工作状态同样会对传递路径产生影响。比如转速、负载大小和润滑情况的变化，都会改变齿轮箱内部的动态特性，进而让振动能量的传递方式和路径发生改变。具体来看，当齿轮箱在不同转速下运行时，离心力等因素会让齿轮、轴承等部件的振动特点发生变化，导致传递路径改变。负载变化也会有影响，高负载可能让齿轮啮合更紧密，但也不可能增加部件的应力，产生新的振动源。润滑状态的作用也不能忽视。良好的润滑能减少摩擦和磨损，降低振动和噪声的产生；而润滑不好的话，可能会让振动更严重，甚至导致部件损坏。除了这些因素，齿轮箱的外部环境和运行时长也会有一定影响。比如温度变化可能改变材料的性能，进而影响振动传递的特点；长时间运行可能让部件磨损更严重，改变传递路径的效率。

3.3 振动传递路径优化策略

在高速行星齿轮箱的振动问题研究里，振动传递路径的优化是绕不开的核心内容。这种齿轮箱在工厂里用得特别多，但它运行时产生的振动不仅会让设备出问题，还会带来烦人的噪音，所以得想办法优化振动传递的路径。

从结构设计入手是个可行的方向。比如调整齿轮的大小、齿数、宽度，或者换用不同型号的轴承、改变轴承安装位置，这些小改动都能影响振动能量在齿轮箱内部的传递方式，让振动不会轻易放大。制造和装配环节也得重视。如果齿轮加

工时误差太大,或者装的时候没调好间隙,很容易额外产生振动和噪音。把这些细节做扎实,振动传递的稳定性自然会好一些。

齿轮箱的工作状态也不能忽视。不同的转速、负载大小,甚至润滑油的状态,都会改变内部的动态表现。根据实际工况调整这些参数,能让振动能量的传递路径更合理。还可以用一些专门的隔振减振办法。在齿轮箱和其他设备连接的地方放个隔振垫,或者装个隔振器,就能阻断一部分振动的传递。要是再用点能吸收振动的材料,效果会更好。实时监测也很重要。装一套振动监测系统,随时盯着齿轮箱的振动情况,发现不对劲就赶紧调整优化策略,这样能保证振动传递路径一直处在比较好的状态。

四、低噪声结构设计与优化

4.1 低噪声设计理论基础

在高速行星齿轮箱的振动传递路径分析与低噪声结构优化研究中,低噪声设计的理论基础是整个研究的核心支撑。低噪声设计的目标是减少高速行星齿轮箱运行时发出的噪声,这既可以让设备用起来更舒服,也能减轻对周边环境的噪声影响。

从理论层面来看,低噪声设计需要结合声学、动力学、材料学等多个学科的知识。比如说,根据声学知识,声音传播和振动脱不开关系,而高速行星齿轮箱的振动正是噪声的主要来源。借助多体动力学的基础理论,我们可以搭建行星齿轮箱的动力学模型,仔细分析振动是怎么传递的,这样就能为低噪声设计提供理论上的支持。

从动力学角度深入研究齿轮箱的动态特性,摸清它的振动规律,能帮助我们在设计时就采取有效办法抑制振动,进而降低噪声。材料学在低噪声设计里也很关键,不同材料的声学性能和减振效果不一样,选对材料、用好材料,就能改善齿轮箱的声学表现,减少噪声的产生和传播。另外,低噪声设计还得考虑结构布局是否合理。通过调整齿轮箱内部各部件的位置,避免出现共振现象,就能把噪声降下来。像有些齿轮箱因为内部齿轮和轴承的位置没摆好,运行时容易产生共振,噪声就特别大,调整布局后这种情况就会改善很多。

4.2 结构优化方法与技术

在结构优化的具体方法和技术上,有不少可以尝试的方向。比如说拓扑优化,就是按照预先设定的设计要求和限制条件,调整齿轮箱内部材料的分布情况,这样做能让结构更轻,同时减少振动和噪音。另外还有形状优化,这种技术主

要针对齿轮箱里的关键零件,对它们的外形做细致调整,通过改变零件的振动特点来降低噪音扩散。尺寸优化也很关键,合理设定各个部件的大小参数,能优化整体结构的动态表现,从源头减少振动和噪音的产生。多学科优化的思路也值得考虑,把声学、动力学、材料学等不同领域的因素都纳入进来,对齿轮箱结构做全面调整,提升低噪声设计的整体效果。

除了这些方法,基于有限元分析的优化技术也常用。先建立精准的齿轮箱有限元模型,模拟它在不同工作状态下的振动和噪音情况,再根据模拟结果对结构做针对性改进。智能优化算法的引入也能帮上忙,像遗传算法、粒子群算法这类工具,能在复杂的优化问题里自动找最优方案,让结构优化的效率和准确性更高。实验验证和反馈优化的环节不能少。通过实际测试收集齿轮箱的振动噪声数据,和优化前的数据对比分析,再根据实验结果调整优化方案,确保结构优化能达到降低噪音的预期效果。

结语

通过对高速行星齿轮箱多体动力学研究,梳理出齿轮箱内部振动是如何从核心部件传递到外壳的具体路径。基于这些分析结果,团队提出了几种能降低运行噪音的结构调整办法,比如优化齿轮啮合间隙、增加支撑部件的阻尼材料等。这些工作让多体动力学在齿轮箱设计领域的应用范围更广了,也给工厂里实际解决齿轮箱振动大、噪音响的问题提供了能用的技术参考。后续还可以继续研究更准确的振动传递路径识别手段,或者尝试一些更有新意的低噪声结构设计,以推动高速行星齿轮箱在性能上实现更大突破,满足日益严格的工业应用需求。

参考文献

- [1]景鸿翔;甄冬;冯国金;崔展博;梁小夏;张浩.行星齿轮箱太阳轮裂纹故障下的振动信号调制特性分析[J].机械传动.2024,49(12):123-130.
- [2]孙明帅;王黎明;聂延艳.考虑传递路径效应的行星齿轮箱断齿故障仿真研究[J].机械传动,2023(02):169-176.
- [3]马浩群;冯志鹏.行星轮不均载的行星齿轮箱振动信号模型[J].振动工程学报,2022(01):196-201.
- [4]樊家伟;郭瑜;伍星;林云;陈鑫.含行星轮局部故障的行星齿轮箱振动仿真及实验研究[J].振动工程学报,2022(05):1270-1277.