

机械结构振动传递的多路径耦合效应关键路径分析

周梓铭

武汉纺织大学 湖北武汉 430200

摘要: 本文论述振动激励源传播机理、路径贡献特征,分析刚度、阻尼等参数对耦合的影响及时域耦合规律。结合结构拓扑和频率敏感性来建立多维关键路径识别体系,讨论能量流和传递函数法应用路径,提出针对性抑制策略。研究给机械结构振动控制提供理论依据,可以提高装备的运行稳定性,在航空航天、工程机械等领域有重要的应用价值。

关键词: 机械结构; 振动传递; 多路径耦合效应

引言

振动经由不同的途径传递并且互相耦合,从而形成复杂的动态响应,传统的单路径分析法很难把握住本质规律。目前工程中振动控制效果不好的主要原因是耦合效应机理认识不清、关键路径定位不清。本文系统研究了多路径耦合机理,提出了科学的关键路径分析方法,给结构设计的优化以及振动抑制能力的提高提供新思路,符合高端装备制造工程需求。

一、机械结构振动传递研究的工程背景与应用场景

机械结构振动传递是各种装备运行过程中普遍存在的现象,多路径耦合效应直接影响装备的核心性能,在航空航天、轨道交通、工程机械、精密机床等各个领域都有迫切的研究和应用需求。航空发动机机匣用螺栓、支架等途径把振动传给机身,造成舱内噪声超标和结构疲劳;高铁转向架振动通过轮对、构架、车体等途径耦合传递,影响乘坐舒适性及轨道寿命;精密加工机床的床身、立柱多路径振动耦合会降低加工精度,导致零件报废率上升。随着装备向高转速、高载荷、高精度方向发展,振动多路径耦合的非线性特征越来越明显,传统减振措施针对性不强^[1]。开展相关研究可以实现振动关键路径的精准控制,给装备结构优化、减振降噪设计提供技术支持,对提高装备的可靠性、服役性能有重要的工程意义。

二、机械结构振动传递的多路径耦合效应

1. 振动激励源特性及其在结构中的传播机理

振动激励源是机械结构振动的源头,激励源的类型以及动态特性影响着振动传播强度、频率范围和耦合方

式。按成因可以分为惯性激励、载荷激励和环境激励三类。惯性激励主要由质量不平衡造成,比如由于转子的偏心引起的周期性的离心力,其幅值和转速的平方成正比,频率集中在基频和倍频上,具有典型的窄带特征;载荷激励来源于工作载荷的波动,比如齿轮啮合力、液压压力脉动等,频率与工况参数有关,并且常常带有非线性谐波;环境激励如地震、气流扰动等大多表现为宽频随机特性,对大型结构影响较大。振动在结构中的传播本质就是能量沿结构路径的传递和转化,主要以纵波、横波和表面波的形式扩散。纵波传播速度快、衰减小,横波在界面处容易发生反射和折射,表面波虽然衰减快,但是对表层振动影响大。传播过程中激励能量在多条路径中分流并相互耦合,当激励频率接近结构固有频率时容易发生共振,使振动响应显著增大。结构界面接触状态会改变传播阻抗,造成能量反射、透射和耗散,使振动传播机理更加复杂。

2. 不同结构路径对振动能量传递的贡献特征

不同的结构路径由于几何形态、连接方式、材料性质的不同,对振动能量传递的贡献也不同,并且随着激励频率、载荷的变化而变化。刚性连接方式如焊接或一体化成型,界面刚度大、能量损耗小,对中高频振动的传递效率最高,容易成为振动扩散的主要通道。柔性连接路径,如橡胶垫、弹簧连接,由于阻尼大,可以有效地衰减低频振动,但是中高频段由于弹性变形或者共振而形成附加传递路径。间断性结构路径如螺栓或键连接,其传递特性对连接状态很敏感,预紧力不够时,由于微动摩擦会消耗能量、产生非线性振动,预紧力足够时可以近似为刚性路径^[2]。另外,路径在结构中的拓扑位置

也会影响能量传递的效果，靠近激励源的路径贡献较大。多路径并存的时候，能量一般会优先沿着效率较高的路径传递，但是当某个频率下原本的次要路径出现共振时，它就会变成主要路径，这时多路径耦合的复杂性就会明显增加。

3. 刚度、阻尼与质量分布对路径耦合的影响

刚度、阻尼和质量分布是决定多路径耦合特性的重要动力学参数，三者组合起来就决定了振动耦合强度以及频率响应。刚度分布不均会造成能量在路径间重新分配，刚度大的路径更容易成为主要的传递通道，而刚度突变的地方容易引起振动波的反射和折射，加剧路径耦合。当路径间的刚度匹配度较低的时候，能量耗散增大但是容易产生局部振动集中，匹配度过高则会放大耦合效应并诱发共振。阻尼通过消耗振动能量来减弱耦合强度，材料阻尼可以降低整体响应幅值，界面阻尼对于螺栓等间断路径的控制更为明显，合理的配置可以减小路径间的能量交换。质量分布改变固有频率和振型来影响耦合特性，质量集中区容易形成振动能量聚集点，增大局部路径耦合，而均匀分布有利于平缓响应。

4. 多路径相互作用引起的频域与时域耦合效应

多路径相互作用会产生明显的频域和时域耦合效应，是结构振动复杂化的主要原因。频域耦合主要表现为共振叠加、频率迁移和带宽拓宽，当多条路径的固有频率接近的时候，共振效应会互相加强，使振动的幅值增大并形成宽频共振带。不同路径之间的频率成分相互影响还会产生新的耦合频率，造成频谱结构复杂化，加大振动控制的难度。时域耦合表现为振动波形畸变、幅值波动和相位差变化，多路径能量交换使振动由简谐形式变为非线性响应，如连接界面微动引起的冲击脉冲现象。不同的路径相位关系会直接影响叠加的效果，相位一致时振动加强，反相时振动减弱。同时时域耦合还会造成局部能量瞬时累积，出现高幅值冲击，给结构安全、疲劳寿命带来不良影响^[9]。频域与时域耦合相互影响，结构振动具有很高的动态性、不确定性，需要用多尺度分析的方法来揭示。

三、机械结构振动传递的多路径耦合效应关键路径

1. 基于结构拓扑特征的振动关键路径识别方法

结构拓扑特征包括拓扑连通性、节点重要度、路径冗余度三个主要指标，拓扑连通性体现各结构节点间连接的强弱，连通性强的路径（核心承重结构路径）因为能量传递阻力小，更容易成为关键路径，可以用图论的

方法把结构抽象成拓扑图，用边权值来表示连接强度，通过计算路径权值总和来筛选关键路径。节点重要度关注拓扑结构中的核心节点（激励源附近节点、结构交汇节点），这些节点是多路径能量的汇聚和分流中心，其振动响应直接影响整体耦合效应，用节点度、介数等拓扑指标可以量化节点重要度，从而锁定以核心节点为枢纽的关键路径，例如航空发动机的机匣连接节点，作为多路径交汇点，其拓扑重要度非常高，对应的连接路径就是关键路径。路径冗余度表示的是路径的替代性，冗余度小的路径（唯一传递路径、核心承载路径等）因为没有替代路径，其对整体响应的影响就大，是关键路径；而冗余度大的路径可以通过其它路径实现能量的传递，对整个系统耦合效应的贡献较小。

2. 频率敏感性分析下的主要振动传递路径判定

频率敏感性表示路径振动响应随激励频率变化剧烈的程度，敏感性高的路径在特定的频率段内，微小的频率变化就会引起振动幅值、能量传递效率的明显波动，这样的路径往往是关键频率段的主要传递路径，可以用传递函数灵敏度分析、频响函数曲线拟合等方法来量化敏感性指标。传递函数灵敏度分析是计算各路径传递函数对频率的导数，反映路径振动传递能力随频率变化的速度，导数绝对值越大，路径频率敏感性越强，在对应频率段的传递贡献越大；频响函数曲线拟合是提取各路径频响曲线的峰值、带宽等参数，判断路径在不同频率段的敏感性，峰值对应的频率段就是路径的敏感频率段，也是该路径成为主要传递路径的关键区间。机械装备的工作频率一般覆盖多个频段，不同的频段主要传递路径有不同，如精密机床低速运行时（低频段）床身刚性路径为主要传递路径，频率敏感度高；高速运行时（中高频段）主轴与工作台连接路径频率敏感性增加，成为主要传递路径^[4]。另外频率敏感性和多路径耦合效应互相影响，敏感频率段内的路径容易和其它路径产生强耦合，从而进一步加强其主导地位，需要采用频率扫描仿真和试验测试相结合的方法，准确地找到各个频段的主要传递路径。

3. 能量流与传递函数法在关键路径分析中的应用

能量流法以振动能量为分析对象，通过跟踪能量在各个路径上的产生、传递、耗散和累积的过程来量化各个路径上的能量传递效率和所占比例，能量传递效率高、占比大的路径就是关键路径。此方法冲破了传统的振幅分析法所存在的缺陷，可以精准地体现出能量在各种路

径之间互相传递的过程,用能量流法,建立能量平衡方程,结合有限元模拟技术,模拟出各条路径能量分布的状态,在工程机械车架的振动分析上,能量流法能清晰地展现出横梁、纵梁路径所占能量比,找到那些所占能量比大于60%的重要路径。能量流法可以找到耗散能量的薄弱环节,进而给增设阻尼来加强耗散、抑制关键路径的振动提供方向。传递函数法用激励和响应的函数关系来表征各个路径的振动传递能力,传递函数幅值越大,路径的振动传递能力越强,越容易成为关键路径。该方法可以通过试验测试和仿真计算两种方式来获得传递函数,试验测试是在激励源施加已知的激励,测量各个路径节点的振动响应,计算传递函数;仿真计算是建立结构动力学模型,模拟不同路径的传递函数特性。传递函数法能准确体现路径的频域传递特性,借助频率敏感性分析,可以找到不同频率段的关键路径,而且能量化路径间的耦合强度,给优化路径传递特性赋予量化指标。将能量流法和传递函数法结合使用,用能量流法确定关键路径的范围,再用传递函数法准确地量化路径的传递特性,可以提高关键路径分析的准确性和可靠性,适用于航空航天、轨道交通等复杂机械结构的关键路径分析。

4. 关键路径控制与振动抑制的工程优化策略

关键路径控制和振动抑制的工程优化策略,以关键路径分析结果为核心,结合结构设计、材料选型和控制技术,建立“源头抑制、路径阻隔、末端减振”的全链条优化体系,实现振动耦合效应的精准控制,兼顾工程可行性和经济性。源头抑制策略针对关键路径的激励源进行优化,从激励源结构、激励强度两方面入手,从根本上减少振动能量的输入,比如对转子偏心造成的惯性激励,通过高精度动平衡校正、优化转子结构设计来减小偏心质量,降低关键路径的振动激励,对齿轮啮合载荷激励,通过优化齿廓参数、提高啮合精度来减小周期性啮合力,削弱关键路径的振动传递动力。路径阻隔策略就是通过改变关键路径的动态特性,阻断或者削弱振动能量的传递,主要手段有刚度优化、阻尼强化、结构重构。刚度优化是通过改变关键路径的截面尺寸、连接方式,使路径的固有频率避开工作频率和激励频率,防止共振耦合;阻尼强化是在关键路径的界面处增加阻尼元件(如阻尼垫、阻尼涂层),提高能量耗散能力,比如

在机床的关键连接路径上涂上高阻尼涂层,可以有效地耗散中高频振动能量。结构重构就是对关键路径的拓扑布局进行优化,减小路径之间的能量耦合,增加关键路径的冗余结构、改变节点的连接方式,破坏能量传递的主通道。末端减振策略是对关键路径的振动输出端进行减振处理,采用被动减振和主动控制相结合的方式,被动减振通过安装减振器、隔振垫等元件来衰减末端振动响应;主动控制则是通过传感器实时采集关键路径振动信号,然后根据控制器产生的反向控制信号,通过作动器抵消振动能量,适合于高精度、高要求的机械装备,如航空发动机关键路径的主动振动控制系统^[5]。另外工程优化要兼顾多目标平衡,在实现振动抑制的同时保证结构强度、重量和成本满足设计要求,利用多目标优化算法建立优化模型,实现关键路径振动抑制和装备综合性能的协同提高。

结束语

本文从激励源传播机理、路径贡献特征、参数影响规律、频域耦合效应四个方面,逐步深入地分析多路径耦合的本质规律,构建起以拓扑特征、频率敏感性和能量流为关键的路径识别系统,给出了全链条振动抑制优化方案。研究冲破传统单路径分析的束缚,加深了对多路径耦合非线性特性认识,给复杂机械结构振动控制赋予了新的理论和技术支撑。

参考文献

- [1] 李征宇, 王薇, 陈强. 基于能量法的高频冲击载荷下机械结构振动特性研究[J]. 舰船电子对抗, 2023, 46(05): 103-107.
- [2] 李志国, 乔百杰, 朱昱达, 周凯, 陈雪峰. 基于测点优化与模态扩展的机械结构振动响应全场重构[J]. 振动与冲击, 2023, 42(09): 123-134.
- [3] 何晋丞. 基于压电换能技术的机械结构振动响应控制方法研究[D]. 南京航空航天大学, 2022.
- [4] 唐刚. 中高速转动机械结构的振动特性研究[J]. 中国设备工程, 2021, (17): 260-261.
- [5] 曹婷婷. 对机械结构振动噪声仿真及控制技术的相关分析[J]. 现代信息科技, 2019, 3(24): 163-164.