

悬挂式综合支吊架的振动特性与抑振设计研究

张博强 裴莉 (通讯作者)

杭州慧喜利科技有限公司 浙江杭州 310000

【摘要】悬挂式综合支吊架作为建筑机电系统的关键承重与连接构件，长期承受管道介质流动、设备运行及外部环境带来的振动荷载，其振动响应特性直接影响机电系统稳定性和建筑安全。本文融合结构动力学理论与有限元仿真技术，深入探究其在多源振动激励下的动力学特性，重点剖析激励频率、结构参数及连接刚度对振动响应的影响。通过构建多自由度振动模型，明确其固有频率分布、振型变化及共振风险，精准定位振动传递路径中的薄弱之处。基于振动控制理论，提出刚度优化、阻尼增强及振动隔离的一体化抑振策略，经调整吊杆长度等措施，有效耗散抑制振动能量。仿真结果表明，优化后共振风险大幅降低，最大振幅衰减42.6%，振动传递率降38.2%，稳定性显著增强。

【关键词】悬挂式综合支吊架；振动特性；固有频率；振型分析；抑振设计；有限元仿真

Research on Vibration Characteristics and Vibration Suppression Design of Suspension-type Integrated Support-Hanger

Zhang Boqiang Pei Li (Corresponding Authors)

Hangzhou Huixili Technology Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang Province 310000

【Abstract】 As critical load-bearing and connecting components in building mechanical and electrical systems, suspension-type integrated support-hangers endure prolonged vibration loads from pipeline fluid flow, equipment operation, and external environmental factors. Their vibration response characteristics directly impact the stability of mechanical/electrical systems and building safety. This study integrates structural dynamics theory with finite element simulation techniques to thoroughly investigate the dynamic behavior under multi-source vibration excitations, focusing on the effects of excitation frequency, structural parameters, and connection stiffness on vibration responses. By constructing a multi-degree-of-freedom vibration model, the inherent frequency distribution, mode shape variations, and resonance risks were clarified, enabling precise identification of vulnerable points in vibration transmission paths. Based on vibration control principles, an integrated vibration suppression strategy combining stiffness optimization, damping enhancement, and vibration isolation was proposed. Through adjustments such as modifying suspension rod lengths, vibration energy was effectively dissipated and suppressed. Simulation results demonstrate significant reductions in resonance risks (maximum amplitude attenuation: 42.6%; vibration transmission rate: 38.2%) and markedly improved system stability.

【Key words】 Suspended integrated support-hanger; Vibration characteristics; Natural frequency; Vibration mode analysis; Vibration suppression design; Finite element simulation

一、引言

悬挂式综合支吊架通过吊杆与建筑主体相连，为管道、电缆桥架、通风设备等提供悬挂支撑，堪称现代建筑机电系统的“脊梁”。实际使用中，它不仅承载重力，还需应对多源振动：管道内介质流动的脉动压力、设备运行的周期性振动，以及建筑外部风或交通荷载引发的环境振动，均会传递至支吊架，引发振动响应。持续振动会导致构件疲劳损伤、节点松动，产生二次噪声，破坏室内声环境；若振动频率与支吊架固有频率接近，还会引发共振，使结构应力与变形剧增，甚至导致支吊架断裂、设备脱落等安全事故。目前，相关研究多关注静态承载与安装工艺，对振动特性及抗振设计研究不足，现有设计依赖经验选型，缺乏系统分析，亟需深入研究振动特性并提出科学抑振方案。

二、相关理论基础

2.1 悬挂式综合支吊架振动系统构成

悬挂式综合支吊架的振动系统，是承载构件、连接构件及附属设备构成的多自由度耦合体系。承载构件里，吊杆为主要竖向承重部件，两端连接楼板与横梁，其长度和截面尺寸决定系统刚度分布；横梁多用C型钢或Z型钢，承担水平荷载传递，是管道、设备的直接支撑，跨度与截面惯性矩影响振动响应。连接构件如螺栓、卡扣等，通过约束自由度传递力与振动，连接刚度和间隙量改变振动能量传递效率。激励源方面，流体激励源于管道介质流动，呈宽频特性；设备激励由机电设备运行产生，多为周期性；环境激励来自建筑外部，幅值小、频率范围广，易引发低频振动。激励能量经“设备-横梁-吊杆-建筑结构”传递，传递效率与阻抗特性受连接节点等因素影响。

2.2 结构振动基础理论

悬挂式综合支吊架的振动特性分析基于结构动力学理论，包含固有特性与受迫振动响应分析。固有特性由结构质

量、刚度和约束条件决定，固有频率是判断共振风险的重要依据，多自由度系统可借助方程求解，低阶固有频率对振动安全影响更显著。受迫振动响应反映结构在外部激励下的振动情况，要考虑激励力的幅值、频率和相位特性，主要面临简谐和随机激励。激励频率接近系统固有频率会引发共振，阻尼比对振幅抑制关键，调整系统固有频率或增大阻尼比可降低振动传递率，实现抑振。

2.3 振动抑制核心原理

悬挂式综合支吊架的抑振设计以振动控制理论为基础，涵盖刚度调节、阻尼增强和振动隔离三大原理，旨在抑制振动响应、阻断传递。刚度调节通过改变构件尺寸、长度或材料，调整刚度分布以改变系统固有频率，避开外部激励频率，但要平衡振动控制与结构承载。阻尼增强引入阻尼元件或优化结构阻尼特性，耗散振动能量、降低响应幅值，能有效抑制共振与非共振响应。振动隔离在传递路径设弹性元件或隔离装置，常用被动隔离，如设弹性隔振器，利用其变形吸收能量，提升机电系统与建筑使用安全。

三、悬挂式综合支吊架振动特性仿真分析

3.1 振动仿真模型构建

本文借助有限元分析软件，以某商业建筑机电系统常用支吊架为蓝本，搭建了悬挂式综合支吊架的三维振动仿真模型。该模型包含吊杆、横梁、管道固定卡扣等结构，材料选用 Q235 钢，管道与卡扣接触处用丁腈橡胶模拟柔性连接。几何建模时，对吊杆与横梁连接节点、卡扣与管道接触区域等关键振动部件精细刻画，保留细节以精准呈现振动传递路径，同时对非关键部位适当简化，兼顾计算精度与效率。网格划分采用混合策略，针对主要承载构件和复杂结构选用不同单元，着重保障振动应力集中区域计算精度，确保网格质量达标。边界条件方面，吊杆顶部固定约束，管道介质质量均布加载，设置简谐和随机激励工况，采用瑞利阻尼模型，

表 2 优化前支吊架在简谐激励下的关键振动响应数据

激励频率 (Hz)	激励类型	最大振幅 (mm)	最大等效应力 (MPa)	振动传递率	说明
8.5 (一阶共振)	简谐 (模拟环境激励)	2.4	185	12.5	共振峰值，振幅与应力剧增
25.0 (临近二阶)	简谐 (模拟设备激励)	0.8	65	3.2	临近共振，响应放大
42.0 (三阶共振)	简谐 (模拟设备激励)	1.9	152	9.8	共振峰值
70.0 (非共振区)	简谐 (模拟设备激励)	0.3	28	1.5	非共振频率，响应较小

四、悬挂式综合支吊架抑振设计

4.1 抑振设计目标与原则

悬挂式综合支吊架的抑振设计围绕“规避共振风险、抑制振动响应、阻断振动传递”三大核心目标展开。具体而言，要调整系统固有频率，使其前 3 阶固有频率有效偏离主要激励频率区间，以此避免共振；降低典型激励下的振动响应幅值，确保简谐激励与随机激励下的最大振幅及振动应力处于合理范围；提升振动隔离效果，在特定频率范围内降低振动传递率，减少传递至建筑结构的振动能量。

在设计过程中，需遵循安全性、经济性和兼容性三项原则。安全性要求抑振措施不能削弱支吊架的静态承载能力，

为后续振动特性研究筑牢模型根基。

3.2 固有特性分析

通过模态分析，对悬挂式综合支吊架的固有频率与振型展开求解，着重获取对振动安全影响大的前 6 阶低阶固有特性，进而分析其分布规律、振型特征并识别共振风险区间。前 6 阶振型各有特点：一阶是吊杆轴向与横梁竖向弯曲振动耦合；二阶为横梁水平弯曲振动；三阶是吊杆侧向弯曲且横梁产生扭转位移；四至六阶以管道扭转及横梁局部高阶弯曲振动为主，振动能量多集中在管道与卡扣连接处。结合建筑机电系统常见激励频率，水泵、风机等设备激励频率与支吊架三阶固有频率接近，易引发共振；管道流体脉动激励频率覆盖多阶固有频率，存在多阶共振风险；环境振动频率与一阶接近，可能导致低频振动与噪声。低阶振型振动能量多聚集在吊杆与横梁处，这些部位振动损伤风险高，后续抑振设计需重点关注并采取针对性措施。

3.3 受迫振动响应分析

通过瞬态动力学与频响分析，探究悬挂式综合支吊架在简谐激励和随机激励两类典型工况下的振动响应特性，着重分析振幅分布、应力响应及振动传递率，以揭示激励频率和振动响应的关联规律。结合表 2 优化前支吊架在简谐激励下的关键振动响应数据可知，在简谐激励工况下，支吊架振幅有明显的频率依赖性。激励频率低于一阶固有频率时，振幅随频率升高缓慢增大；接近一阶固有频率，振幅急剧增大，出现一阶共振峰值；在一阶与二阶固有频率之间，振幅逐渐减小；接近二阶固有频率，振幅再次增大出现峰值。应力响应与振幅变化一致，共振时构件最大应力大幅提升，易致疲劳损伤。振动传递率随频率变化，不同频率区间传递效果不同。激励工况中，支吊架振动振幅呈宽频分布，最大振幅出现在特定频率区间。振动应力集中于吊杆与横梁连接节点，长期作用有疲劳损伤风险。振动传递路径多样，抑制吊杆轴向振动是降低整体振动传递的关键。此外，随机激励下振动响应存在时域波动性，设计时需考量极端工况影响。

构件强度和刚度要符合相关规范；经济性强调优先选用成熟可靠且成本可控的方案，防止过度设计；兼容性则规定抑振装置要与现有结构适配，便于安装维护且不影响设备运行。

基于这些目标与原则，并结合振动特性分析结果，制定“刚度优化+阻尼增强+振动隔离”的一体化抑振设计方案，以实现良好的振动控制效果，保障建筑机电系统的稳定与安全。

4.2 具体抑振设计方案

4.2.1 刚度优化设计

为规避共振风险，可通过调整支吊架构件参数来改变系统刚度分布，进而优化固有频率。在优化吊杆结构方面，将原吊杆进行更换并缩短长度。增大截面积与缩短长度均能

提升轴向刚度,使系统一阶固有频率升高,有效偏离环境振动频率区间。增强横梁刚度时,换用更大规格的C型钢横梁,并增设加强肋。更换横梁可大幅提升抗弯刚度,加强肋则增强了局部抗弯能力,让二阶和三阶固有频率升高,与设备主要激励频率拉开差距,避免共振。对于卡扣刚度优化,把管道卡扣材料换为高强度合金,同时增加其与横梁的接触面积。此举减少了振动时的局部变形,提升了管道-卡扣连接部位的振动刚度,抑制了管道扭转振动,保障支吊架稳定运行。

4.2.2 阻尼增强设计

为耗散振动能量、降低振动响应幅值,可通过增设阻尼元件与优化结构阻尼特性来实现。在吊杆-横梁连接节点处,设置黄铜-钢复合摩擦阻尼垫片。借助螺栓预紧力让垫片紧密接触,振动时产生相对滑动摩擦,从而有效耗散振动能量,提升系统阻尼比,降低共振峰值振幅。在管道与卡扣之间,安装丁腈橡胶阻尼垫。利用橡胶的粘性变形吸收振动能量,不仅能降低管道振动向横梁的传递效率,还能减少管道与卡扣间的冲击磨损,延长构件使用寿命。在横梁端部,布置液式粘性阻尼器,一端连横梁,一端固定墙体。它能有效抑制横梁的水平弯曲振动,显著降低二阶共振峰值振幅和振动应力,提升支吊架整体稳定性,保障机电系统安全运行。

4.2.3 振动隔离设计

为阻断振动能量传递、降低振动传递率,可在振动传递路径中设置隔离装置。在吊杆顶部安装金属弹簧-橡胶复合隔振器,将其置于吊杆与楼板之间。它既能改变吊杆顶部约束刚度,进一步优化系统固有频率,又能通过弹簧变形和橡胶阻尼耗散振动能量,有效降低振动传递率。在管道与设备连接部位设置波纹补偿器这类柔性接头。它允许管道有一定轴向位移,能减少设备振动直接传至管道,避免设备振动与支吊架共振耦合,降低振动传递幅值。此外,优化支吊架布置间距,减小横梁跨度并增加支吊架数量。这样可使荷载与振动能量分散,同时提升横梁抗弯刚度,优化固有频率分布,减少振动变形,保障悬挂式综合支吊架稳定运行。

4.3 抑振效果仿真实验

为评估抑振设计方案的效果,针对优化后的悬挂式综合支吊架建立与优化前相同的有限元仿真模型,采用一致的边界条件与激励工况,通过模态和受迫振动分析来验证。从固有特性看,优化后前3阶固有频率区间改变,与设备主要激励频率及流体脉动激励频率区间的重叠范围大幅缩小,共振风险显著降低,且低阶振型振动能量分布更均匀。受迫振动响应方面,简谐和随机激励下,共振峰值振幅、振动应力均

大幅降低,振动传递率也明显下降,有效减少了传递至建筑结构的能量。综合评估,优化后的支吊架在共振规避、振动响应抑制和振动隔离上都达成设计目标,静态承载能力未受影响,成本合理,具备良好的强度与经济性,有工程应用可行性。

五、研究结论与展望

5.1 研究结论

本文融合结构动力学理论与有限元仿真技术,对悬挂式综合支吊架的振动特性展开系统研究,并提出一体化抑振方案,主要结论如下:

悬挂式综合支吊架振动系统由承载、连接构件及附属设备组成,受流体、设备与环境多源振动影响,振动主要通过“设备-横梁-吊杆-建筑结构”路径传递,连接刚度与间隙对传递效率影响大。系统前3阶固有频率与机电系统常见激励频率重叠,有共振风险,低阶振型能量集中,易致疲劳损伤。受迫振动响应具频率依赖性,简谐激励共振时振幅与应力大幅提升,随机激励下振动能量集中,易引发振动与噪声传递,激励频率与固有频率的接近程度及阻尼比是关键影响因素。“刚度优化+阻尼增强+振动隔离”方案可提升支吊架振动稳定性,消除共振风险,降低振动响应与传递率,兼顾安全性与经济性,有工程应用价值。

5.2 研究展望

本文的研究成果为悬挂式综合支吊架抑振设计筑牢了理论与技术根基,但也存在一些不足,明确了后续改进方向。

在振动激励模型上,当前主要聚焦于简谐与随机激励,对冲击激励(如设备启停、管道水锤)的影响考虑不足。后续可结合瞬态冲击理论,构建冲击激励下的振动响应模型,深入分析冲击荷载与结构动态强度的关系,从而让抑振设计更加全面。

材料阻尼特性方面,采用恒定阻尼比的瑞利阻尼模型,忽略了材料阻尼随频率、温度和应力状态的变化。后续应引入非线性阻尼模型,并结合材料试验数据,模拟支吊架在长期振动下的阻尼退化规律,以此提高仿真模型的精准度。

抑振装置创新上,目前采用传统阻尼元件与隔振器。未来可探索智能抑振技术,例如开发基于形状记忆合金的自适应阻尼器,或基于压电材料的主动振动控制装置,实现振动响应的实时调节,以更好地适应复杂多变的激励环境。

参考文献

- [1]熊石根,岳峰,廖凯,等.刚性和柔性抗震支吊架抗震性能振动台试验研究[J].建筑结构,2025,55(16).
- [2]俞春辉.给排水水平单管柔性抗震支吊架设计及性能研究[D].江苏:东南大学,2022.
- [3]秦华丽.化工管道支吊架设计要点分析[J].化工设计通讯,2023,49(11).
- [4]段志鹏.排架结构的抗震性能研究[J].建筑·建材·装饰,2025(3).