

平台+人才需求切入点”构建珠三角“311”深度产教融合模式。例如，深圳职业技术学院与华为共建ICT学院，课程更新周期缩短至6个月，而沧州课程滞后企业需求2-3年。苏州健雄职业技术学院推行“现代学徒制”，政府提供每生每年1.2万元补贴，企业承担50%培养成本。沧州虽尝试订单班，但缺乏财政支持，企业参与度不足40%。重庆依托工业园区成立产教联盟，学校、企业、科研机构共建技术研发中心，构建“产教联合体”模式，如长安汽车与职业院校联合开发新能源实训模块。沧州尚未形成此类协同创新平台，产学研脱节明显。

4 沧州中职学校机械设计制造类专业深入产教融合的对策

4.1 深化校企合作机制，构建协同育人模式

建立政府主导的校企合作平台，由沧州市教育局牵头，联合沧州市工信局、沧州市机械行业协会和本地制造业企业，成立校企合作领导小组。该小组负责制定校企合作的总体规划，协调各方资源，促进校企合作的深入开展。

探索订单培养和现代学徒制。与本地优秀企业合作，开展订单培养模式。根据企业需求定制人才培养方案，明确培养目标、课程设置和教学内容。同时，探索现代学徒制，将学生的学习与企业实践紧密结合，提高学生的实践能力和就业竞争力。选取沧州市两到三家优质企业作为试点，开展订单培养和现代学徒制，形成可复制的经验后在全市推广。

引入行业协会作为中介。通过行业协会，帮助学校与企业建立长期稳定的合作关系。行业协会可以起到桥梁作用，使校企之间能深入合作，增强合作的实效性。定期举办校企合作洽谈会，学校与企业深度对接，保证校企合作持续性和稳定性。

4.2 优化课程体系，提升教学针对性

按照沧州制造业发展趋势，及时更新机械设计制造类专业的设置和课程内容，融入智能制造、数控加工等新技术。比如联合沧州市机械行业协会和当地制造业企业，成立课程开发专家组，定期更新课程内容。

与地方企业合作开发课程，确保所教学内容符合企业的实际需求。把企业实际项目引入课堂，让企业技术人员参与教学，让学生在真实项目中学习和实践，增强学生的实际操作能力和解决问题的能力。

4.3 加强实践教学，提升学生动手能力

加大投入，更新中职学校的实训设备，引入数控加工设备和智能制造设备，建设现代化的实训基地。由沧州市教育局牵头，联合沧州市财政局和本地制造业企业，设立专项基金，用于实训设备的更新和实训基地的建设。优化实训课程设置，增加实践教学环节，提升学生动手实践的机会。与本地企业合作，建立校外实训基地，定期组织学生到企业进

行参观和实践，让学生在真实的工作环境中进行实践，提升学生的实际操作能力和职业素养。

4.4 推进数字化转型，提升教学效果

建设数字化教学资源库，开发虚拟仿真教学系统，提升教学效果。利用大数据、人工智能等技术，优化教学管理，通过大数据分析，了解学生的学习情况，优化教学内容和教学方法。与企业合作开发数字化教学资源：共享企业的真实案例和数据，提升教学的针对性和实效性。

4.5 加强政策支持，提升产教融合实效性

出台相关政策引导校企合作，由沧州地方政府出台相关政策，引导校企合作，提供税收优惠、资金补贴等支持政策。建立校企合作的激励机制，鼓励企业参与职业教育，提供资金、设备和师资支持。加强与地方政府、行业协会的合作，整合社会资源，提升产教融合的实效性。

5 结语

在世界制造业加速向智能化，数字化转型的时代背景下，职业教育作为支撑产业高质量发展的重要基石，其改革与创新已经刻不容缓。沧州是京津冀协同发展中的重要节点城市，装备制造业正处于由“制造”向“智造”跃升的关键期，对高素质技术技能人才的需求日益迫切。然而，目前沧州中职学校机械设计制造类专业在产教融合进程中仍存在校企合作动力不足、课程体系落后、师资力量薄弱、实践条件限制、学生职业素养欠缺及政策支持乏力等多方面的结构性矛盾，严重制约了人才培养质量与产业适配度。

要破解这一困局，必须要构建“政府引导、行业搭桥、企业主体、学校主导”的多元协同育人新生态。通过深化校企合作机制、优化课程内容供给、强化实践教学能力、推进教育数字化转型、完善政策保障体系等一系列系统性对策，才能真正打通产教融合的“最后一公里”，实现教育链、人才链与产业链、创新链的有机衔接。

沧州今后要以“中国制造2025”和职业教育现代化为契机，立足本地产业实际，推动中职教育从“被动适应”走向“主动服务”，从“规模扩张”走向“内涵提升”。唯有如此，才能培育出既懂理论又精实操、既有工匠精神又具数字素养的新时代技能人才，为区域经济转型升级注入强劲动能，也为全国同类地区的职业教育改革提供可借鉴、可复制的“沧州样本”。

参考文献

- [1] 孙雅平,杜军,张晶晶,等.沧州市职业教育和产业深度融合问题探析[J].科技经济市场,2022,(12):146-148.
- [2] 郗艳梅,张铁壁,张鹏程.地方新工科机械类专业产教融合模式的探索与实践[J].教育教学论坛,2022,(11):133-136.
- [3] 陈鹏,李欣冉.新质生产力背景下我国产教融合政策的话语生成及优化建议[J].教育与职业,2024(23):5-13.

Vibration characteristic analysis and vibration reduction measures of mechanical transmission system

Yongqiang Zhou

Jiangtong Group Guixi Smelter, Guixi, Jiangxi, 335400, China

Abstract

Mechanical transmission systems commonly encounter vibration issues during operation, where dynamic characteristics directly affect equipment performance, safety, and service life. Different types of mechanical transmission mechanisms exhibit diverse vibration patterns due to variations in structural composition, load characteristics, and operating environments. This paper conducts a systematic analysis of vibration characteristics in mechanical transmission systems, systematically examines vibration behaviors of typical devices such as gears, chains, and belt drives, and explores the interaction between primary excitation sources and structural parameters. Building on this foundation, frequency domain analysis, finite element modeling, and multibody dynamics methods are employed for dynamic modeling and feature identification. Consequently, multiple targeted vibration reduction strategies are proposed, including structural optimization design, vibration isolation component configuration, and manufacturing precision enhancement. The effectiveness of these mitigation measures is validated through multidimensional engineering evaluation methods, providing theoretical foundations and technical pathways to improve operational stability and reliability of mechanical transmission systems.

Keywords

mechanical transmission; vibration characteristics; dynamic modeling; structural optimization; vibration reduction design

机械传动系统振动特性分析与减振措施

周永强

江铜集团贵溪冶炼厂, 中国·江西 贵溪 335400

摘要

机械传动系统在运行过程中普遍面临振动问题, 其动态特性直接影响设备的性能、安全性与使用寿命。不同类型的机械传动机构因结构构成、载荷特性和工作环境的差异, 呈现出多样化的振动模式。本文围绕机械传动系统的振动特性展开系统分析, 梳理了齿轮、链条、带传动等典型装置的振动表现, 探讨了主要激励源与结构参数的相互作用关系。在此基础上, 引入频域分析、有限元建模与多体动力学方法进行动态建模与特征识别, 进而提出多种针对性的减振策略, 包括结构优化设计、隔振部件配置与制造精度提升等。通过多维度工程评价手段验证减振措施的有效性, 为提升机械传动系统的运行稳定性与可靠性提供理论基础与技术路径。

关键词

机械传动; 振动特性; 动力学建模; 结构优化; 减振设计

1 引言

机械传动系统作为各类动力设备的核心组成部分, 其稳定性与运行效率受到振动水平的显著制约。在高载荷、高转速及复杂载荷工况下, 传动机构极易产生周期性或非周期性的振动现象, 进而诱发噪声、磨损甚至结构损伤问题。对振动特性的全面理解与有效控制已成为机械系统设计与运维中亟待解决的重要课题。现阶段, 机械传动系统的振动源包括结构不平衡、齿轮啮合误差、联轴器不对中等多种因素, 其传播路径与响应形式复杂多变。针对这一问题, 亟需借助

理论建模与工程分析手段揭示振动本质, 并结合实际应用环境, 构建系统性减振策略, 以保障机械设备在多工况条件下的稳定运行与技术可靠性。

2 机械传动系统振动的基本特性

2.1 振动类型及表现形式

机械传动系统中的振动类型主要包括扭转振动、弯曲振动和轴向振动, 其表现形式受到载荷变化、转速波动与结构刚度的耦合作用。扭转振动常出现在动力输入端存在周期扰动的条件下, 易造成联轴器冲击与轴系疲劳。弯曲振动普遍存在于长轴结构中, 受到轴承刚度及支撑间距影响较大, 会引发共振现象。轴向振动则常由推力波动或端部约束不稳定所致, 对齿轮啮合精度与接触应力有显著干扰。这些振动

【作者简介】周永强(1998-), 男, 中国江西贵溪人, 本科, 助理工程师, 从事设备维护研究。

在时间上表现为周期性、准周期性或随机性，在频率域上呈现单频、倍频或带状谱结构，对系统动态响应和噪声水平构成显著影响，必须予以系统识别与控制。

2.2 结构参数对振动的影响规律

机械传动系统的结构参数对振动响应具有显著调控作用，其中齿轮模数、轴径、支撑间距、材料阻尼系数等为关键变量。当轴径从 25mm 增至 40mm，系统弯曲振动频率由 75Hz 上升至 130Hz，表现出结构刚度提高对低频振动的抑制作用。在齿轮副中，当啮合刚度由 $2.5 \times 10^7 \text{N/m}$ 调整至 $3.8 \times 10^7 \text{N/m}$ ，系统在激励频率为 800Hz 处的响应幅值下降了 38%。若采用阻尼系数为 0.035 的高阻尼复合材料制成支架，可使传动系统的谐振峰值降低 43%。支撑间距从 400mm 增至 650mm 时，轴系振型发生转移，原有二阶模态向高频区迁移，有效避免了工作频率与模态频率的重合。结构设计中的尺寸选择与材料匹配直接决定了系统振动响应的幅度、频率范围与稳定性。

3 常见机械传动装置的振动特征分析

3.1 齿轮传动系统的啮合振动特性

齿轮传动在载荷传递过程中产生周期性的啮合冲击，其振动特性受齿形误差、啮合刚度变化与润滑状态影响显著。齿轮副在啮合周期内的刚度呈现周期性变化，形成激励源，引发倍频响应与边带结构。非对称齿形或制造偏差将导致啮合点瞬移，引发局部共振现象，尤其在高速状态下表现为尖锐的谐波峰。润滑不良易诱发齿面微振磨损，进一步加剧振动能量的释放。在重载工况下，接触应力波动会引发非线性激励，进而导致振动频谱出现宽带扩展和调制效应。对于精密齿轮系统，微小的偏心或齿距误差均可能显著放大传动中的振动幅度。

3.2 链传动与带传动中的非线性振动行为

链传动与带传动系统具有明显的柔性连接特性，在变载与冲击条件下易产生非线性振动。链条由于节距结构与节间摩擦，形成激励源，在速度变化过程中呈现跳动与滑移现象。链轮啮合过程的不连续性导致激振力产生周期性失稳，表现为高阶谐波的显著增强。带传动系统中，带的张力波动与滑动摩擦易引发横向弯曲振动，其频谱结构通常较为复杂。在高转速状态下，带轮不平衡及轴间非平行将进一步放大系统的非线性响应。柔性元件的内在阻尼虽对高频振动有抑制作用，但在激励频率接近固有频率时仍可能引发共振放大，需要借助非线性建模方法进行动态特性识别与响应预测。

3.3 联轴器与轴系中的扭转与弯曲耦合振动

联轴器与轴系连接处的结构特性直接影响系统的振动耦合行为。在一套典型传动系统中，轴长为 1.2m、轴径为 32mm，当传递扭矩达到 240Nm 时，系统在 280Hz 出现耦合共振。若联轴器存在径向间隙 0.3mm，扭转与弯曲模态

将发生频率重叠，激发非线性交叉调制现象。轴承支撑刚度为 $1.1 \times 10^7 \text{N/m}$ 时，系统二阶模态频率为 390Hz，若刚度提升至 $1.6 \times 10^7 \text{N/m}$ ，该模态频率提升至 460Hz，有效扩大了安全运行带宽。高阶模态响应中，轴系挠度与扭角同时出现峰值，说明在动态载荷下，结构耦合会导致振动能量在不同自由度间转移，对系统疲劳寿命与精度保持提出更高要求。

4 振动分析方法与动态建模技术

4.1 基于频域与时域的信号分析方法

机械传动系统的振动信号在时间与频率维度中具有丰富的动态信息，时域分析主要侧重于加速度、速度与位移信号的波动特征，能够识别冲击、间断与周期性扰动行为。常见方法包括均方根值、峰值、峭度与包络分析等，适用于早期故障识别与短时冲击特征提取。频域分析则强调激励频率与系统模态的匹配关系，通过快速傅里叶变换、功率谱密度与频谱图可以揭示系统的主导激励频率与谐波成分，适合诊断周期性与共振类型故障。两者结合可实现多维度信号识别，提升系统状态评估的全面性与可靠性。

4.2 有限元法在结构振动建模中的应用

有限元法在机械传动系统振动建模中具有显著优势，其基于结构离散化思想，将复杂部件划分为若干单元，通过节点耦合构建系统总体刚度矩阵、质量矩阵与阻尼矩阵。该方法适用于分析结构模态特性、频响函数与应力分布，能有效预测局部振动热点与耦合响应行为。在传动系统建模中，需精确模拟齿轮接触、轴承支撑及壳体约束等边界条件，保证模型与实际工况的一致性。有限元模型通过模态分析可识别系统主振型与临界频率，为避振设计与参数优化提供基础支撑，并可结合实验模态分析进行验证与修正，提升模型的预测能力与实用价值。

4.3 多体动力学模型在传动系统中的构建

多体动力学建模将机械系统视为刚体与柔性体组合体，通过约束关系与动力学方程建立系统整体运动模型。在某高速齿轮传动系统中，包含 9 个刚体、14 个转动自由度和 3 个非线性弹性连接元件，模型预测总自由度达 104 个。在转速为 7200rpm、载荷 340Nm 条件下，模型预测齿轮副动态啮合力峰值为 1800N，与实验结果误差为 6%。在联轴器建模中引入柔性体特征后，扭转响应频率由原 450Hz 下移至 405Hz，说明柔性效应显著影响系统动态行为。多体动力学可有效描述系统非线性响应、接触刚度变化与动态耦合特性，为高速重载工况下的动态性能预测与减振控制提供仿真依据与数据支撑。

5 减振设计策略与结构优化路径

5.1 提高部件刚度与阻尼特性的设计方法

提高部件刚度与阻尼特性是降低机械传动系统振动的基础途径。结构刚度提升可有效提高固有频率，使系统远离激励频率，减少共振风险。在设计过程中通过增大轴径、优