

建筑机械施工中混凝土泵车布料臂振动控制的仿真分析

刘洪梅

130924*****4346

摘要:在建筑机械施工领域,混凝土泵车作为关键设备,其布料臂的稳定运行对施工效率与质量具有直接影响。然而,布料臂在作业过程中易受多种因素影响而产生振动,这不仅会降低混凝土浇筑精度,还可能缩短设备使用寿命,甚至引发安全隐患。本文围绕混凝土泵车布料臂的振动控制展开仿真分析研究。首先,剖析布料臂振动产生的主要原因,涵盖结构动力学特性、液压系统波动以及外部施工载荷变化等方面;其次,基于多体动力学与有限元分析理论,构建布料臂振动仿真模型,明确模型的边界条件与载荷施加方式;然后,设计多种振动控制策略,如被动减振、主动控制以及半主动控制,并通过仿真手段对比不同策略的控制效果;最后,总结仿真分析结果,为实际工程中混凝土泵车布料臂振动控制方案的优化提供理论参考,以提升布料臂作业稳定性,保障建筑施工的高效与安全。

关键词:振动控制; 仿真分析; 多体动力学

DOI: 10.69979/3060-8767.25.10.057

引言

随着我国建筑行业朝着大型化、高层化方向发展,混凝土泵车凭借其灵活的布料能力,在桥梁、高层建筑、市政工程等施工场景中得到广泛应用。布料臂作为混凝土泵车的核心工作装置,承担着将混凝土精准输送至浇筑部位的重要任务,其运行稳定性至关重要。在实际施工过程中,布料臂通常处于多节伸缩、变幅回转的动态工况,同时受到混凝土输送压力波动、液压驱动系统冲击以及外界风载荷等因素的综合作用,极易产生振动现象。

布料臂的振动会引发一系列问题:从施工质量层面来看,振动可能导致混凝土浇筑过程中出现离析、漏浆等情况,影响结构构件的强度与耐久性;从设备性能层面来看,长期振动会加剧布料臂结构件的疲劳损伤,增加销轴、液压管路等零部件的故障率,缩短设备维护周期与使用寿命;从施工安全层面来看,剧烈振动可能导致布料臂姿态失控,对施工现场人员与设备安全构成威胁。因此,深入研究混凝土泵车布料臂的振动特性,设计有效的振动控制策略,具有重要的工程实用价值。

目前,针对机械结构振动控制的研究已形成较为成熟的理论体系,包括被动控制、主动控制和半主动控制等技术路线。在混凝土泵车领域,相关研究多集中于布料臂结构强度优化与液压系统性能提升,而对振动控制的系统性仿真分析仍有待深入。本文依托多体动力学与有限元分析软件,构建布料臂振动仿真模型,模拟不同工况下的振动响应,对比评估多种振动控制策略的有效

性,旨在为布料臂振动控制技术的工程应用提供理论支撑。

1 混凝土泵车布料臂振动成因分析

混凝土泵车布料臂振动由结构、液压系统及外部载荷共同作用引发,其特性与结构设计、工作原理及施工环境密切相关,明确成因是构建仿真模型与设计控制策略的基础。

1.1 结构动力学特性引发的振动

布料臂为多节铰接悬臂梁结构,在作业过程中柔性特征显著。臂架伸缩、变幅或回转时,质心的动态变化会导致固有频率改变,若运动速度过快或动作切换频繁,惯性力易引发共振,从而加剧振动。同时,臂架铰接部位存在间隙,在动态载荷作用下会产生冲击振动,降低结构稳定性。从材料角度分析,尽管布料臂采用高强度钢材,但长期承受动态载荷会导致弹性变形与塑性累积,使结构刚度下降,固有频率向低频偏移,增加与外部激励频率重合的概率,进而诱发更明显的振动。

1.2 液压驱动系统波动引发的振动

布料臂的运动由液压系统驱动,油缸输出力的稳定性决定了臂架的平稳性。液压泵流量脉动、溢流阀压力波动以及液压油的压缩性,会使油缸输出力产生周期性波动,以力激励的形式引发布料臂振动。液压泵运转时,齿轮或柱塞的周期性运动导致流量脉动,使油缸速度不均,臂架出现“爬行”振动;动作切换时,换向阀使油

液突然转向，产生液压冲击，造成臂架瞬时剧烈振动。此外，环境温度波动会改变液压油的黏度，影响系统的阻尼特性，削弱振动抑制能力，间接加剧振动。

1.3 外部施工载荷变化引发的振动

在施工过程中，布料臂承受混凝土输送压力、风载荷及人员操作载荷等，其动态变化是重要的外部振源。混凝土输送时，管路内摩擦与混凝土的离散性导致压力随机波动，通过管路传递至臂架末端，产生横向激励；输送泵切换输送缸时，压力骤变形成冲击，加剧振动。在风载荷方面，平均风会使臂架产生静态偏移，脉动风则产生随机激励，在高层建筑施工中，长伸出臂架受风的影响更大，脉动风可能导致大幅摆动。同时，地面不平、人员走动及其他设备振动的传递，也会干扰臂架的稳定，诱发或加剧振动。

2 混凝土泵车布料臂振动仿真模型构建

基于振动成因分析，结合多体动力学与有限元分析方法构建布料臂振动仿真模型，该过程需充分考量布料臂的结构特性、液压系统的动态特性及外部载荷的变化规律，以确保仿真结果的准确可靠。

2.1 模型构建理论基础

多体动力学理论能够有效模拟布料臂各节臂架的铰接运动与结构变形，是研究多刚体与柔性体耦合运动的关键工具；有限元分析理论可计算布料臂的固有频率、振型及在载荷作用下的应力与变形分布，为振动特性分析提供基础数据。模型构建

模型构建采用“多体动力学+有限元”联合仿真方法：首先，借助多体动力学软件构建布料臂多体模型，明确臂架刚体属性、铰接约束以及液压驱动系统动力学参数；其次，将多体模型中的柔性臂架导入有限元软件，完成网格划分并赋予材料属性，构建柔性臂架有限元模型；最后，通过软件接口实现两类模型的数据交互，形成耦合仿真模型，以精确模拟布料臂的振动响应。

2.2 模型几何参数与材料属性定义

布料臂的几何参数参照典型混凝土泵车的实际结构确定，采用多节伸缩式设计。各节臂架的长度、截面尺寸以及铰接部位参数均依据实际设备的设计图纸设定，截面形式需确保结构受力合理。

布料臂选用高强度钢材，在有限元模型中为单元赋予相应的材料属性，以准确体现结构刚度与质量分布特性，为振动特性分析提供可靠的材料参数支撑。

2.3 边界条件与载荷施加

2.3.1 边界条件定义

在多体动力学模型中，布料臂与转台的连接采用固定铰约束，限制平移自由度，仅保留转动自由度；各节臂架的铰接采用旋转铰约束，明确转动范围与阻尼系数，以模拟实际运动特性与能量耗散。在有限元模型中，转台连接部位施加固定约束以模拟支撑作用，臂架铰接部位施加耦合约束，确保与多体模型的运动协调一致。

2.3.2 载荷施加方式

结合实际工况施加三类载荷：惯性载荷通过定义臂架运动轨迹，由软件自动计算惯性力与力矩进行模拟；液压驱动力载荷基于液压系统数学模型，将油缸输出力的变化作为力载荷施加于连接点，以模拟驱动作用与波动激励；外部载荷方面，混凝土输送压力载荷施加于臂架末端的管路接口，风载荷按照规范分为静载荷与随机载荷施加，施工人员操作载荷以均布载荷的形式施加于工作平台。

2.4 仿真求解设置

仿真求解分为两个阶段：首先进行模态分析，求解固有频率与振型，确定共振频率范围；然后开展瞬态动力学分析，设置时间步长与终止时间，模拟典型工况下的振动响应，输出关键部位的位移、速度、加速度以及应力变化曲线。

求解采用特定积分方法以保障结果的稳定精度，同时设置收敛准则，当位移、速度、加速度的计算误差低于阈值时判定收敛，避免仿真结果失真。

3 混凝土泵车布料臂振动控制策略与仿真验证

基于布料臂振动仿真模型，设计被动减振、主动控制、半主动控制三种策略，通过仿真对比筛选出最优方案。

3.1 被动减振策略

通过添加粘性阻尼器等元件改变结构的刚度与阻尼，具有结构简单、成本低廉、可靠性高的优势。阻尼器布置于各节臂架的铰接部位，对称安装以避免附加力矩。仿真结果显示，合理选择阻尼系数可有效降低振动，但参数无法随外部激励频率进行调整，难以适应复杂工况。

3.2 主动控制策略

由加速度传感器、DSP 嵌入式控制器、电液伺服作动器组成系统，采用 LQR 算法实现最优控制。传感器采

集振动信号，控制器生成指令驱动动作器施加控制力。仿真表明，其振动控制效果显著优于被动减振，能够实时跟踪载荷波动，但系统复杂、成本高昂、能耗较大，对安装维护的要求较高。

3.3 半主动控制策略

介于被动与主动控制之间，选用磁流变阻尼器（具有毫秒级调节阻尼的特性），配备模糊控制算法（以振动加速度及变化率为输入，动态调整阻尼系数）。仿真显示，其控制精度接近主动控制，能够快速适应工况变化，且结构简化、成本与能耗较低，磁流变阻尼器的抗故障能力强，维护周期长。

3.4 策略对比

从五个维度进行对比：被动减振控制效果较低、复杂度较低、成本较低、无能耗、适应性较高，适用于简单工况；主动控制控制效果较高、复杂度较高、成本较高、能耗较高、适应性中等，适用于高精度特殊工况；半主动控制控制效果中等偏高、复杂度中等、成本中等、能耗较低、适应性较高，在控制效果与经济性之间实现平衡，适用于多数施工场景，具有较高的工程推广价值。

4 仿真模型与控制策略的有效性验证

为确保仿真结果的可靠性，需从模型与控制策略两方面，结合理论与试验验证其准确性与可行性。

4.1 仿真模型有效性验证

4.1.1 模态验证

通过锤击试验测量实际布料臂的固有频率与振型，并与仿真模型的模态分析结果进行对比。选取最大伸展状态下的前若干阶固有频率作为指标，结果显示二者数值相近，相对误差在工程可接受范围内，证明模型能够准确反映布料臂结构的动力学特性。

4.1.2 瞬态响应验证

在实际布料臂上安装加速度传感器，采集满负荷混凝土输送工况下臂架末端的振动加速度信号，与仿真瞬态分析结果进行时域、频域对比。时域上，试验与仿真的加速度峰值接近，误差较小；频域上，二者的主要振动频率范围一致，且与低阶固有频率相吻合，功率谱密度分布趋势相同，说明模型能够精准模拟实际工况下的振动响应。

4.2 控制策略有效性验证

选取半主动控制策略进行验证，在实际布料臂的铰接部位安装磁流变阻尼器与模糊控制器，构建系统模拟

多工况控制效果。试验显示，安装系统后臂架的位移、加速度振幅得到显著抑制，控制效果明显，与仿真误差合理，验证了策略的有效性与仿真的可信度；且系统可长时间稳定运行无故障，阻尼器调整响应快，进一步证明其可靠性与动态性能满足施工需求。

5 结论与展望

5.1 研究结论

布料臂振动是由结构动力学特性、液压系统波动以及外部施工载荷共同引发的。三者耦合构成核心成因；“多体动力学+有限元”联合仿真能够精准模拟振动特性，为控制策略设计提供可靠支撑平台；

三种控制策略各自适配相应场景：被动减振成本较低但控制效果有限，适用于简单工况；主动控制精度较高但成本与能耗较大，适用于特殊高精度工况；半主动控制（磁流变阻尼器+模糊控制）可平衡控制效果与经济性，适用于多数施工场景，具备较高工程应用价值；

仿真模型与半主动控制策略经试验验证，其精度与效果均达到预期标准，研究成果具备可靠性与可行性。

5.2 研究展望

优化仿真模型：引入温度场、流场、电磁场等多物理场耦合，提升模型的全面性与精确性；

融合智能算法：结合深度学习算法，实现振动的预测性控制，提高系统的自适应能力与响应速度；

轻量化与一体化设计：运用拓扑优化方法与复合材料开发轻量化磁流变阻尼器，集成监测功能，实现降重与降本目标；

数字孪生应用：构建布料臂数字孪生模型，实现控制策略的在线优化、故障预警以及全生命周期管理，推动相关技术朝着智能、精准、绿色方向发展。

参考文献

- [1] YiH, BinXingWU, JiaqianW. 混凝土泵车臂架振动响应的主动控制实验研究 [J]. Issue: 2, 2012, 31(2): 91-94.
- [2] 杨镇源. 混凝土泵车臂架系统结构动态特性分析及减振研究 [D]. 重庆大学, 2015. [1] 盛鑫. 混凝土泵车臂架振动分析与控制 [D]. 吉林大学, 2014.
- [3] 余金华. 混凝土泵车臂架振动研究 [D]. 武汉科技大学, 2015.
- [4] 杨镇源. 混凝土泵车臂架系统结构动态特性分析及减振研究 [D]. 重庆大学, 2014.