

# 机械系统主动振动控制与被动隔振技术研究

王 栋 周圣宏 赖勇辉

昌河飞机工业(集团)有限责任公司 江西 景德镇 333000

**摘要:** 本文旨在深入探讨机械振动系统中主动控制与被动隔振技术的原理、特点及应用范围,通过对比分析两者在振动控制效果、适应性、成本及维护需求等方面的差异,为不同应用场景下的振动控制策略选择提供理论依据。主动控制通过实时施加控制力或力矩实现动态调整,而被动隔振则依赖于材料或结构的固有特性来吸收或反射振动能量。两者各有优劣,适用于不同的工程需求。

**关键词:** 机械振动系统; 主动控制; 被动隔振; 对比

## 引言

机械振动是工程领域常见的问题,不仅影响设备的正常运行,还可能导致设备损坏、噪音污染及能效降低。因此,有效的振动控制技术对于提高机械系统性能和可靠性至关重要。主动控制与被动隔振作为两种主要的振动控制手段,在理论研究和实际应用中均展现出独特优势。本文将系统地对这两种技术进行对比分析。

### 1 主动控制技术概述

#### 1.1 基本原理

主动控制技术是一种高度先进的振动抑制策略,其核心在于通过外部激励系统主动地对振动系统施加精确的控制力或力矩,以达到有效减少或消除振动的目的。首先,通过高精度、高灵敏度的传感器,系统能够实时捕捉振动系统的状态信息,包括振动频率、振幅、相位等关键参数。这些传感器如同系统的“眼睛”,为后续的控制策略制定提供了准确的数据支持。其次,控制器作为系统的“大脑”,根据传感器提供的实时数据,运用先进的算法和模型,迅速计算出最优的控制策略。这一过程涉及对振动系统的深入理解和精确建模,以确保控制策略的有效性和准确性。常用的主动控制方法包括负反馈控制、频率调谐及自适应控制等。负反馈控制通过实时监测振动状态并施加相反的控制力来抑制振动;频率调谐则通过调整系统的固有频率来避免共振现象;自适应控制则能够根据振动环境的变化实时调整控制策略,以达到最佳的振动抑制效果<sup>[1]</sup>。最后,执行器作为系统的“肌肉”,根据控制器的指令,迅速、准确地施加相应的控制力或力矩。这一过程要求执行器具有高度的响应速度和精确的控制能力,以确保控制策略的有效实施。

#### 1.2 系统组成

主动控制系统是一个高度集成、协同工作的系统,通常由传感器、控制器和执行器三部分组成。传感器是

系统的感知器官,负责实时监测振动系统的状态。传感器的选择和设计对于系统的性能具有至关重要的影响,因此需要根据具体的应用场景和需求进行精心挑选和优化。控制器是系统的核心处理单元,负责根据传感器提供的数据计算最优的控制策略。控制器的性能直接影响到整个系统的振动抑制效果,因此需要具备强大的计算能力和高效的算法支持。执行器是系统的执行机构,负责根据控制器的指令施加相应的控制力或力矩。它们需要具备高度的响应速度和精确的控制能力,以确保控制策略能够得到有效实施。执行器的设计和选择也需要根据具体的应用场景和需求进行优化,以达到最佳的振动抑制效果。

### 2 被动隔振技术概述

#### 2.1 基本原理

被动隔振技术是一种基于材料或结构阻尼特性的振动隔离方法。其核心原理在于利用具有阻尼特性的材料或结构,如橡胶、金属弹簧或空气弹簧等,来吸收或反射振动能量,从而实现振动源与被隔振物体之间的能量传递隔离。当振动波从振动源传递到隔振元件时,由于其阻尼特性,振动能量会被转化为其他形式的能量,如热能,从而被消耗掉,达到隔振的效果。这种能量转化的过程是基于材料内部的分子摩擦和结构变形来实现的。例如,橡胶隔振器利用其高弹性和阻尼特性,将振动能量转化为热能并散发出去;金属弹簧隔振器则通过弹簧的弹性变形来吸收和储存振动能量,从而减少振动的传递。常见的被动隔振器包括橡胶隔振器、金属弹簧隔振器和空气弹簧隔振器等。它们在不同的应用场景中发挥着重要的隔振作用,如机械设备、建筑物、交通工具等。

#### 2.2 系统组成

被动隔振系统的结构相对简单,主要由隔振元件和

机械连接件两部分组成。隔振元件负责隔离振动源与被隔振物体之间的能量传递。通常具有特定的阻尼特性和弹性模量，能够有效地吸收和反射振动能量。隔振元件的选择和设计对于系统的隔振效果具有至关重要的影响。例如，橡胶隔振器需要选择合适的橡胶材料和硬度，以确保其具有良好的阻尼特性和弹性；金属弹簧隔振器则需要考虑弹簧的刚度、形状和尺寸等因素，以达

到最佳的隔振效果。机械连接件则用于将隔振元件与振动源和被隔振物体连接起来，确保系统的稳定性和可靠性<sup>[2]</sup>。它们通常包括螺栓、螺母、垫片等紧固件，以及连接板、支撑架等结构件。机械连接件的选择和设计也需要考虑振动环境和使用要求，以确保其能够承受振动和冲击，并保持系统的稳定性。

### 3 主动控制与被动隔振技术的对比分析

表1 主动控制与被动隔振技术性能对比表

对比要点	主动控制	被动隔振
能源需求	需要外部能源	不需要外部能源
响应速度	快速响应外部振动变化	响应速度相对较慢
适用范围	适用多种类型振动，包括低频和高频振动	通常在特定频率范围内效果较好
控制精度	高精度，可实时调整以适应不同振动条件	控制精度相对较低，受材料特性和设计限制
稳定性	由于可以实时调整，性能稳定性较好	性能稳定性受材料老化和环境变化影响
成本与维护	成本较高，需要定期维护和校准	成本较低，维护简单

具体分析如下：

#### 3.1 能源需求对比

##### 3.1.1 主动控制系统

主动控制系统需要外部能源来驱动作动器、传感器以及控制系统中的其他电子设备。这些外部能源可以是电能、液压能或其他形式的能源，具体取决于系统的设计和应用场景。由于主动控制系统需要实时监测振动状态、计算控制策略并执行控制动作，因此其能源消耗相对较高。特别是在高频振动或复杂振动环境下，主动控制系统的能源消耗可能会进一步增加。

##### 3.1.2 被动隔振系统

与主动控制系统不同，被动隔振系统不需要外部能源来驱动作动器或执行其他控制动作。它主要依靠隔振元件（如橡胶、金属弹簧等）的固有特性来吸收或反射振动能量，从而实现隔振效果。由于被动隔振系统无需外部能源，因此具有显著的节能特性。在长期使用过程中，这可以降低能源消耗和运行成本，对于追求节能减排和可持续发展的应用场景尤为重要。

#### 3.2 适应性对比

##### 3.2.1 主动控制技术的适应性

主动控制技术以其广泛的适应性著称，能够在多种不同的振动环境下有效工作。这主要得益于其实时监测、动态调整的核心机制：（1）实时监测能力：主动控制系统通过高精度的传感器实时监测振动状态，包括振动频率、振幅、相位等关键参数。为后续的控制策略调整提供准确的数据支持。（2）动态调整策略：基于实时监测到的振动数据，控制器运用先进的算法和模型，动态计算出最优的控制策略。这一过程不仅考虑了当前的

振动状态，还可能预见到未来的振动趋势，从而提前做出调整。因此，主动控制系统能够根据振动环境的变化实时调整控制力或力矩的大小和方向，确保振动抑制效果的最优化。（3）广泛的应用场景：由于主动控制技术具有广泛的适应性，它能够在多种振动环境下发挥作用，包括低频、高频、宽频振动以及复杂多变的振动环境。这使得主动控制技术在精密仪器、医疗设备、航空航天、交通运输等众多领域得到广泛应用。

##### 3.2.2 被动隔振技术的适应性

相比之下，被动隔振技术的适应性相对较差，主要表现在以下几个方面：一是特定频率范围有效：被动隔振器通常只在特定频率范围内表现良好。这是因为其隔振效果主要依赖于隔振元件的固有频率和阻尼特性。当振动频率与隔振元件的固有频率相近时，隔振效果最佳；而当振动频率远离固有频率时，隔振效果会显著下降。二是无法实时调整：被动隔振器一旦设计完成并安装到位，其隔振性能就基本确定，无法根据振动环境的变化进行实时调整。这意味着在振动环境发生显著变化时，被动隔振器的隔振效果可能无法满足要求。三是应用场景受限：由于被动隔振技术的适应性相对较差，其应用场景也相应受到限制。它更适用于振动环境相对稳定、振动频率范围相对狭窄的场景<sup>[3]</sup>。在这些场景中，被动隔振器能够以较低的成本和复杂度实现有效的振动隔离。

#### 3.3 精度与稳定性对比

##### 3.3.1 主动控制技术的精度与稳定性

精度方面：主动控制系统采用高精度的传感器来监测振动状态，能够准确捕捉振动频率、振幅等关键参数，为精确控制提供了基础数据。控制器运用先进的算

法和模型对传感器数据进行处理,能够计算出最优的控制策略。这些算法通常具有高度的精确性和鲁棒性,能够确保控制策略的准确性和有效性。主动控制系统能够根据振动环境的变化实时调整控制策略,以适应新的振动状态。这种实时调整能力进一步提升了系统的控制精度。

**稳定性方面:**主动控制系统通过传感器、控制器和执行器形成一个闭环控制回路。在这个回路中,控制器根据传感器反馈的信号不断调整控制策略,以维持系统的稳定状态。当外界振动干扰系统时,传感器会立即捕捉到这些变化并将信号传递给控制器。控制器根据反馈信号迅速计算出相应的控制力或力矩,并通过执行器施加到被控对象上,以抵消外界振动的影响。这种反馈调节过程确保了系统在面对外界干扰时能够保持稳定。

### 3.3.2 被动隔振技术的精度与稳定性

**精度方面,**被动隔振器主要依赖隔振元件的材料特性来吸收或反射振动能量。然而,这些材料的阻尼特性和弹性模量通常是固定的,无法根据振动环境的变化进行调整,因此限制了其控制精度。被动隔振器通常在特定频率范围内表现良好。当振动频率超出这个范围时,隔振效果会显著下降,从而影响控制精度。

**稳定性方面:**被动隔振系统缺乏实时反馈机制,无法根据振动状态的变化及时调整隔振策略。因此,在面对复杂多变的振动环境时,其稳定性可能受到影响。由于被动隔振系统无法实时调整以应对外界干扰,因此其对外界振动的敏感性较高。在强烈的振动干扰下,被动隔振系统的稳定性可能受到挑战。

## 3.4 成本与维护对比

### 3.4.1 成本对比

**主动控制系统:**由于集成了大量的高精度传感器、执行器以及复杂的控制算法,其硬件和软件成本都相对较高。这些高精度传感器能够实时监测振动状态,执行器则负责根据控制策略施加相应的控制力或力矩,而复杂的控制算法则需要强大的计算能力来支撑。除了硬件成本外,主动控制系统的研发与集成也需要投入大量的人力、物力和财力。这包括算法的开发、优化、测试,以及系统的集成、调试等过程。

**被动隔振系统:**结构相对简单,主要由隔振元件(如橡胶、金属弹簧等)和机械连接件组成。这些隔振元件的成本相对较低,且易于获取和生产<sup>[4]</sup>。由于被动隔

振系统不依赖于复杂的控制算法和传感器,因此也无需投入大量的研发与集成成本。

### 3.4.2 维护对比

**主动控制系统:**由于设备复杂,需要定期进行维护以确保其正常运行。这包括传感器的校准、执行器的检查与更换、控制系统的软件更新等。这些维护工作需要专业的技术人员进行,且成本相对较高。主动控制系统的正常运行高度依赖于其内部的传感器、执行器和控制系统。一旦其中某个部分出现故障,可能需要专业的技术人员进行修复或更换,这也增加了维护的复杂性和成本。

**被动隔振系统:**结构简单,维护起来相对方便。其主要维护工作包括定期检查隔振元件的状态(如是否老化、损坏等)以及更换损坏的元件。这些工作可以由非专业人员进行,降低了维护的复杂性和成本。由于被动隔振系统不依赖于外部能源和控制系统,因此其长期稳定性较好。在正常使用情况下,被动隔振系统能够长期保持其隔振性能,减少了因系统故障而导致的停机时间和维护成本。

## 结语

主动控制技术与被动隔振技术在机械振动控制中各有优劣。主动控制技术以其广泛的适应性、快速的响应速度和高精度的控制效果,在需要高性能和快速响应的场合具有显著优势。而被动隔振技术则因其成本低廉、维护简单及在特定频率范围内的高效隔振效果,在许多简单应用中更具优势。未来,随着科技的不断进步和应用需求的不断提升,机械振动控制技术将迎来更广阔的发展空间。主动控制技术与被动隔振技术的有机结合将是未来的发展趋势之一,通过优势互补,实现更高效、更经济的振动控制解决方案。同时,新材料、新结构和新算法的应用也将进一步推动振动控制技术的发展。

## 参考文献

- [1]邵静.起重机械振动主被动混合控制方法研究[J].机械制造与自动化,2021,50(03):72-75+79.
- [2]宋春.机械加工过程中机械振动的原因及对策探讨[J].中国设备工程,2024,(11):176-178.
- [3]徐震,朱封涛.机械振动力学在现代工业中的应用[J].内燃机与配件,2021,(09):210-211.
- [4]韩明.机械振动分析在检修中的应用[J].现代制造技术与装备,2020,56(12):154-155.