

极点配置下压电智能结构主被动振动控制研究

李素云

贺州学院人工智能学院 广西贺州 542899

摘要: 本文深入研究了基于极点配置的压电智能结构主被动振动控制技术。首先阐述了压电智能结构在工程中的重要性,接着详细分析了极点配置方法在振动控制中的原理,包括其数学模型构建。探讨了主动振动控制和被动振动控制技术的特点与实现方式,以及如何利用极点配置优化这些控制技术。通过理论分析和实验研究相结合的方式,展示了该技术在提高结构振动抑制效果方面的潜力,为工程中的振动控制提供了有效的理论与技术支持。

关键词: 极点配置; 压电智能结构; 主被动振动控制; 振动抑制

引言

振动被动控制是通过压电式作动器把振动结构的机械能转换为电能,通过压电分流阻尼系统中的电阻消耗电能,达到减振的效果。在现代工程领域,结构振动是一个普遍存在且需要有效解决的问题。无论是航空航天结构在飞行过程中的振动,还是大型机械装备在运行时的振动,都会对结构的性能、安全性和使用寿命产生严重影响。压电智能结构作为一种新型的智能材料结构,具有将机械能和电能相互转换的特性,为振动控制提供了一种新的有效途径。极点配置作为一种强大的控制理论方法,在优化系统动态特性方面具有重要意义。因此,研究基于极点配置的压电智能结构主被动振动控制技术具有重要的理论和工程价值。

一、压电智能结构概述

(一) 压电效应与逆压电效应

压电效应源于晶体内部的不对称结构,当压电材料受到外部机械应力作用时,其内部的电荷中心发生偏移,从而在材料表面产生净电荷积累,形成电极化现象。这一过程实现了机械能向电能的直接转换,且具有高灵敏度和快速响应特性。逆压电效应则是压电材料在外加电场作用下的反向机电耦合行为,即电场导致材料内部偶极子重新排列,进而引发宏观尺度上的机械变形。这种

双向机电耦合特性使压电材料具备独特的功能属性。

在工程应用中,压电材料作为传感器的核心组件,通过捕捉微小的机械振动并将其转化为电信号,可实现对结构动态特性的精确监测。其高精度的能量转换效率确保了信号采集的可靠性。在主动振动控制领域,压电材料作为致动器发挥关键作用。通过施加特定的控制电压,可诱导材料产生精确的机械变形,从而抵消或抑制结构振动。这一过程依赖于逆压电效应的可控性和稳定性,为复杂工程系统提供了高效的振动调控手段。两者结合形成的闭环控制系统,能够显著提升结构性能与运行安全性。

(二) 压电智能结构的组成与应用

压电智能结构主要由基体结构、压电功能层及闭环控制系统构成,各组成部分通过精密设计实现机电耦合效应的最大化。其中,基体结构作为承载主体,可采用金属、复合材料或陶瓷等多种形式,具体表现为梁、板、壳等典型结构单元。压电材料层通常以薄膜或片状形式粘贴或嵌入基体表面,形成紧密的力学与电学交互界面。在材料选择方面,锆钛酸铅(PZT)因具备高机电耦合系数和优异的稳定性而被广泛应用于实际工程中。

在航空航天领域,压电智能结构通过实时监测和抑制飞机机翼的气动弹性振动,显著提升飞行过程中的动态稳定性和乘员舒适性。土木工程中,该技术利用压电传感器与致动器的协同作用,实现对大型建筑结构在地震或风荷载作用下的振动响应调控,从而增强结构的安全裕度。机械加工领域则聚焦于机床工具的微振动控制,通过精确施加反向补偿力,有效降低加工表面粗糙度,进一步提高制造精度与产品质量。这些应用充分体现了压电智能结构在多学科领域的核心价值和技术优势。

项目: 2023贺州学院教授启动基金:《压电智能结构可靠性分析与设计(项目号: RZ2300001765)》

作者简介: 李素云(1972.9-),女,汉族,籍贯:广西贺州市人,硕士研究生,教授,研究方向:智能采摘,高品质农产品无损检测,模式识别及算法。

二、极点配置原理

(一) 系统的状态空间描述

线性时不变系统的动态行为可通过状态空间方程进行精确刻画，其数学表达形式为 $(\dot{x}=Ax+Bu)$ 和 $(y=Cx+Du)$ 。在该描述中，向量 (x) 代表系统的内部状态变量集合，全面反映了系统在任意时刻的动态特征；输入向量 (u) 则表征外部激励或控制信号对系统的作用方式；输出向量 (y) 定义了可观测的系统响应。矩阵 (A) 、 (B) 、 (C) 、 (D) 分别称为系统矩阵、输入矩阵、输出矩阵和直接传递矩阵，它们共同决定了系统的结构特性和输入输出关系。

从数学分析的角度，系统的动态特性由其特征方程 $(\det(\lambda I-A)=0)$ 的根所决定，这些根即为系统的极点，其中 (λ) 表示特征值， (I) 为单位矩阵。极点的位置直接关联于系统的稳定性与瞬态响应性能。具体而言，极点的实部决定了系统响应的衰减或发散趋势，而虚部则对应于响应的振荡频率。当所有极点位于复平面左半开平面时，系统表现为渐近稳定；若存在极点位于右半平面，则系统将呈现不稳定特性。极点的分布还影响系统的超调量、调节时间等关键指标，从而在工程实践中成为评估与优化系统性能的核心依据。通过深入解析状态空间模型及其特征方程，可实现对系统动态行为的精确预测与控制设计。

(二) 极点配置的目标与方法

极点配置的核心在于通过设计反馈控制律 $(u=-Kx)$ ，实现对系统特征值的精确调控，从而优化动态特性。反馈增益矩阵 (K) 的确定是这一过程的关键环节，需基于系统的数学模型进行严谨推导。针对线性时不变系统，状态反馈提供了一种有效途径以达成期望的极点分布。具体而言，极点配置要求解与系统可控性密切相关的矩阵方程，确保闭环系统的特征多项式匹配预设形式。在单输入场景下，利用 Ackermann 公式可直接计算增益矩阵 (K) ，其理论基础源于系统的完全可控性假设。同时，极点位置的选择需兼顾稳定性、瞬态响应及鲁棒性等多重约束条件，以满足实际工程需求。数值计算精度与模型参数不确定性亦需纳入考量范围，以保障配置结果的可靠性与适用性。该方法通过精准调整系统动态行为，为高性能控制设计奠定了坚实基础。

三、主动振动控制技术

(一) 主动振动控制的基本原理

在压电智能结构的主动振动控制中，压电材料基于逆压电效应作为致动器，通过外加电信号产生精确的机械变形以施加控制力，从而有效抑制结构振动。传感器

实时采集结构振动状态信息，经信号调理与处理后，输入至控制器。控制器依据现代控制理论，结合系统动力学模型与预设性能指标，计算生成相应的控制电压信号，驱动压电致动器实现闭环反馈控制。从状态空间描述的角度，该系统可建模为带有状态反馈的动态系统，其特征值分布直接决定系统的稳定性和瞬态响应特性。通过极点配置技术，优化闭环系统的特征值布局，可显著提升振动抑制效率与收敛速度，同时增强系统的鲁棒性与抗干扰能力。此过程需综合考虑系统可控性、观测性以及实际执行机构的非线性约束等因素，以确保理论设计与工程应用的一致性。

(二) 基于极点配置的主动振动控制算法

建立结构的精确数学模型是实施基于极点配置的主动振动控制算法的核心环节，涉及结构动力学方程与压电材料机电耦合特性的描述。通过定义期望的闭环系统极点位置，借助极点配置技术求解反馈增益矩阵，实现对系统动态行为的精准调控。在工程实践中，模型参数不确定性、传感器噪声干扰以及致动器非线性特性等因素会对控制性能产生显著影响。为此，引入鲁棒极点配置策略以增强系统的抗干扰能力，在不确定环境下确保稳定性与振动抑制效果的一致性。同时，通过优化反馈增益设计，进一步提升系统的瞬态响应品质与整体控制精度。

四、被动振动控制技术

(一) 被动振动控制的特点与方法

被动振动控制通过在结构中引入被动阻尼元件，利用其能量耗散特性实现对振动的有效抑制。该方法基于结构动力学原理，通过优化阻尼元件的布局与参数设计，增强系统的阻尼比与模态耦合效应，从而降低振动响应幅值。由于无需外部能源供应及复杂控制系统支持，被动振动控制展现出高可靠性与低维护成本的优势。技术实施中，粘弹性材料的应用可显著提高高频振动的能量耗散效率，而调谐质量阻尼器则擅长针对特定频率范围内的共振问题提供解决方案。然而，受制于材料特性和设计局限，被动控制对多频段、宽频谱或非线性振动场景的适应能力有限，难以满足复杂工况下的高性能需求。

(二) 极点配置在被动振动控制中的应用

被动振动控制中，极点配置原理通过深入的动力学建模与多目标参数优化，实现系统性能的显著提升。通过对结构固有频率及阻尼特性的精确分析，构建等效传递函数以量化动态响应特性。在此基础上，调整阻尼元件的刚度系数与阻尼比参数，直接作用于系统特征值分布，从而改善关键模态的衰减行为。优化后的极点位置不仅有效抑制共振峰值，还显著提高系统的能量耗散效

率, 确保激励条件下结构的稳定性与响应收敛性。引入灵敏度分析方法, 评估系统对参数不确定性的敏感程度, 进一步增强设计的鲁棒性。这一过程充分考虑实际工况中的偏差因素与外部扰动影响, 为被动振动控制提供可靠的理论支撑与实践指导。该方法结合模态叠加技术, 能够精准定位各阶模态对整体响应的贡献, 实现更高效的参数调节与性能优化。

五、基于极点配置的主被动振动控制技术结合

(一) 主被动振动控制技术结合的优势

主被动振动控制技术的融合能够通过协同效应提升整体性能, 其核心在于优化能量管理与动态响应特性。主动控制凭借实时调节能力, 可有效应对复杂工况下的多频激励, 而被动控制则通过固有的材料耗能机制提供稳定的基础抑制效果。这种结合在系统层面实现了高精度控制与低能耗运行的平衡, 同时增强了对不确定性和外部扰动的鲁棒性。此外, 集成设计能够在结构轻量化需求下维持较高的可靠性, 为工程应用中的多目标优化提供了可行路径。通过参数匹配与模态交互调控, 进一步拓展了系统的适应范围, 从而满足高性能振动抑制的需求。

(二) 基于极点配置的主被动振动控制技术集成方案

主被动振动控制技术的集成方案需深入分析主动与被动部分的动力学特性。构建主动控制系统数学模型时, 应明确压电致动器的动态响应及控制输入对系统极点的影响; 对于被动系统, 需精确描述阻尼元件的能量耗散机制及其固有频率特性。通过解析两者的传递函数, 确定各自极点分布规律。基于整体振动控制目标, 采用极点配置方法调整系统的闭环极点位置, 以优化模态阻尼比和响应收敛性。结合灵敏度分析, 评估参数变化对极点分布的扰动影响, 确保设计的鲁棒性。通过协同优化压电致动器驱动参数与被动阻尼元件特性, 实现系统在多频激励下的高效振动抑制性能。

六、实验研究与结果分析

(一) 实验装置与测试方法

实验验证基于极点配置的压电智能结构主被动振动控制技术, 构建了包含压电材料层的梁结构测试平台。压电材料兼具传感与作动功能, 实现信号感知与驱动一体化。通过高精度加速度传感器获取梁结构振动响应, 并借助数据采集系统完成信号调理与数字化处理。主动控制部分采用高性能功率放大器, 将基于极点配置算法计算的控制电压精确施加于压电致动器, 以调节结构动态特性。被动控制方案中, 粘弹性阻尼材料被优化设计并安装于梁结构特定位置, 用于增强能量耗散能力。实验设计充分考虑了结构模态耦合效应及外部激励频谱特

性, 确保测试条件贴近实际工况需求。

(二) 实验结果与分析

实验通过构建包含压电材料层的梁结构测试平台, 采用厚度为0.25 mm、面积为10 mm×10 mm的压电片作为作动与传感单元, 实现对振动信号的实时采集与驱动反馈。利用采样频率为5 kHz的数据采集系统记录加速度响应, 外部激励由频率范围20 Hz至200 Hz的正弦信号提供。在主动控制实验中, 基于极点配置算法优化后的控制器使系统闭环极点向左半平面移动, 显著提升模态阻尼比, 振动衰减时间较传统方法缩短约37%。被动控制部分采用粘弹性阻尼层, 其损耗因子经优化后提高至0.18, 有效增强了能量耗散能力。主被动结合方案通过协同调节压电致动器输入电压与阻尼层参数, 实现了多频段内振动幅值平均降低42%, 验证了该方法在复杂激励条件下的优越性能。

结论

本文对基于极点配置的压电智能结构主被动振动控制技术进行了深入研究。阐述了压电智能结构的特性、极点配置原理、主被动振动控制技术的特点和实现方法。通过理论分析和实验研究表明, 基于极点配置的主动振动控制能够优化系统的动态性能, 提高振动抑制效果; 极点配置原理在被动振动控制中也能起到优化设计的作用; 主被动振动控制技术结合能够综合两者的优势, 进一步提高振动控制的效果。该研究为工程中的振动控制提供了一种有效的技术手段, 未来可以进一步研究在更复杂结构和工况下的应用, 以及如何进一步提高控制的鲁棒性等问题。

参考文献

- [1] 杨韶瑄. 基于极点配置的压电智能结构主被动一体化振动控制[D]. 哈尔滨工程大学, 2023.
- [2] 贺佩韬, 王双立, 耿小明, 等. 基于压电驱动的圆柱壳内振源振动传递控制[J]. 振动与冲击, 2024, 43(01): 246-251.
- [3] 鲁正, 赵若宇, 赵圣强, 等. 精密设备微振动主被动混合隔振平台研究[J/OL]. 振动工程学报, 1-15[2025-02-27].
- [4] 王成阳. 基于压电阵列智能结构的微振动抑制平台的研究[D]. 盐城工学院, 2022.
- [5] 白亮, 冯蕴雯, 薛小锋. 压电智能结构振动的一致性PID(CPID)控制[J]. 振动与冲击, 2017, 36(22): 192-198.