

# 压电智能结构的力电耦合、分布式传感与控制研究

李素云

贺州学院 人工智能学院, 广西壮族自治区贺州市, 542899;

**摘要:** 本文深入研究了压电智能结构中的力电耦合、分布式传感与控制。阐述了力电耦合的基本原理及其在压电智能结构中的表现形式, 分析了分布式传感技术在获取结构状态信息方面的优势与机制, 探讨了控制策略对优化压电智能结构性能的重要意义。通过对相关理论、模型与实验研究的综合论述, 为压电智能结构在工程等多领域的广泛应用提供理论与技术支持。

**关键词:** 压电智能结构; 力电耦合; 分布式传感; 控制

**DOI:**10.69979/3041-0673.25.04.063

## 引言

压电材料具有独特的力电转换特性, 这一特性使其在智能结构领域具有广泛的应用前景。压电智能结构是将压电材料与基体结构相结合, 通过力电耦合效应实现结构的自我感知、诊断和控制等功能的新颖结构。在航空航天、土木工程、机械工程等众多领域, 对结构的健康监测、振动控制、能量收集等有着不断增长的需求, 这使得压电智能结构的研究成为当前的一个热点。深入研究力电耦合、分布式传感与控制对于充分发挥压电智能结构的优势、拓展其应用范围具有至关重要的意义。

## 1 压电智能结构的力电耦合

### 1.1 力电耦合的基本原理

压电效应的核心在于正压电效应与逆压电效应的相互作用。正压电效应表现为机械应力作用于压电材料时, 其内部晶格结构发生畸变, 导致离子位移并形成宏观极化, 从而在材料表面产生束缚电荷。这一过程体现了机械能向电能的转换机制。而逆压电效应则是在外部电场作用下, 压电材料内部的偶极子排列发生变化, 进而引发晶格应变, 实现从电能到机械能的转换。这两种效应共同构成了压电材料独特的力电耦合特性。

微观层面的非中心对称晶体结构是压电效应产生的根源。在这种结构中, 离子的不对称分布使得外加应力或电场能够诱导极化状态的变化。当机械应力施加于压电材料时, 晶体内离子间的相对位移打破了原有的电荷平衡, 形成了净极化强度。这一极化强度直接决定了表面电荷密度的大小和分布特征。与此同时, 外加电场的作用会改变偶极矩的方向与幅度, 从而引起晶格的形变响应。这种双向耦合关系为压电智能结构的功能实现提供了理论依据, 并在实际应用中展现出高度的灵敏性和可调控性。

### 1.2 力电耦合在智能结构中的表现形式

力电耦合在智能结构中的表现形式可通过其对结构力学特性和电学特性的相互作用机制进行深入探讨。压电元件在外部载荷作用下的正压电效应会引发电荷生成, 这一过程直接反映了机械应力的空间分布特性及其动态变化规律。电荷的产生与分布不仅取决于加载条件, 还受到材料微观晶体结构和界面效应的影响, 从而进一步影响整体结构的电场分布特性。

从逆向角度看, 当外加电场施加于压电元件时, 其内部晶格应变通过逆压电效应改变结构的几何形态与力学性能。这种变化具体体现为结构刚度矩阵的调整以及边界条件的重新定义, 从而对结构的整体响应模式产生显著影响。在实际应用中, 这种双向耦合关系能够通过精确建模与仿真分析得以量化, 并用于优化结构设计及控制策略。

对于特定结构形式而言, 如薄板结构, 力电耦合的作用机制更为复杂。其振动特性受力电耦合参数的调制, 表现为固有频率漂移、模态形状畸变以及能量传递效率的变化。力电耦合还可能引入非线性动力学行为, 如频率锁定与谐波共振现象, 这些特性需要结合高阶理论模型进行解析描述, 以揭示其内在物理机制并实现精准预测。

## 2 分布式传感技术

### 2.1 分布式传感的概念与优势

分布式传感作为一种先进的监测技术, 与传统集中式传感形成对比, 其核心在于通过在结构中布置多个压电传感器节点, 实现对结构状态信息的多点采集与全面感知。这种技术基于传感器网络的空间分布特性, 能够显著提升监测系统的空间分辨率, 从而捕捉到结构局部细微的状态变化及其动态演化过程。相较于集中式传感仅依赖单一或少量传感器获取全局性宏观信息, 分布式传感具备更强的局部敏感性, 能够深入揭示结构内部的复杂力学行为和损伤机制。

在健康监测领域，分布式传感通过多点数据融合，为结构状态评估提供了更为详尽的信息支持。其高精度的空间覆盖能力使得微小损伤的起始、扩展路径以及损伤累积效应得以被精确识别和量化。此外，该技术通过对多源数据的协同分析，可有效降低单点测量误差的影响，增强监测结果的可靠性和鲁棒性。同时，分布式传感系统的设计还需考虑传感器布局优化问题，以确保信号采集的完整性和一致性，满足复杂工程结构的多样化监测需求。这一技术的引入不仅提升了监测系统的性能，还为智能结构的状态评估与寿命预测提供了重要的技术支持。

## 2.2 分布式传感的机制

压电传感器在分布式传感中的应用，依赖于其对结构状态变化的高度敏感性以及正压电效应的物理机制。当结构经历应变、应力或温度场的变化时，压电材料内部的晶格畸变会诱导电荷的产生，从而形成可检测的电信号。这些信号不仅包含应变量值和方向的信息，还可能反映应力集中区域或温度梯度分布特征。通过在结构中布置多个压电传感器节点，可以实现对结构状态的多点同步采集。这种多源数据的获取方式为结构状态的全面表征提供了基础。

在信号处理层面，分布式传感系统需要结合先进的算法以提取关键信息。具体而言，基于多传感器阵列的数据融合技术能够有效提升信号解析的精度与可靠性。通过对电信号的时间序列特性进行分析，可识别结构动态响应中的瞬态或稳态特征。借助空间相关性分析方法，可以从多节点信号中重构出结构的全场应变分布或应力场形态。这一过程涉及复杂的数学建模与数值计算，例如采用有限元逆问题求解或机器学习模型优化，以实现从离散数据到连续场量的有效映射。

分布式传感机制的核心在于将物理量的变化转化为电信号，并通过智能化算法实现对复杂结构状态的精准描述。这种方法在工程监测领域展现出显著优势，特别是在捕捉局部损伤演化及全局性能退化方面具有独特价值。该机制的成功实施需综合考虑传感器布局优化、信号噪声抑制以及数据处理效率等多方面因素，以确保系统的整体性能满足实际需求。

## 3 控制策略

### 3.1 主动控制

主动控制通过外部能量供给与反馈机制，基于传感器获取的实时结构状态信息，对压电智能材料实施精确调控。控制器依据预设算法生成补偿信号，并将其转化为驱动指令作用于压电执行器，以实现预期的动态响应调整。在振动抑制领域，该方法利用闭环反馈系统捕捉

结构振荡特征，结合频域分析与时间序列建模，生成与振动方向相反的作用力或应变场，从而有效降低振动幅值并优化结构稳定性。

为确保控制效果，需综合考虑多物理场耦合特性与动力学行为。具体而言，控制策略的设计需融入模态参数辨识、非线性补偿以及鲁棒性优化等关键技术。外部干扰源的识别与抑制也是提升控制精度的重要环节。系统的硬件架构需具备高带宽和低延迟特性，以满足实时数据采集与快速响应的需求。

从能量管理角度出发，主动控制系统需要高效的功率放大器与能量回收模块，以平衡能耗与性能之间的关系。这要求设计过程中采用多目标优化方法，权衡控制效率与资源消耗。在实际应用中，环境适应性与长期可靠性亦是关键考量因素，需通过实验验证与仿真分析相结合的方式，确保系统在复杂工况下的稳定运行。

### 3.2 被动控制

被动控制依托压电材料本征的机电耦合效应，通过结构设计与材料特性优化，无需外部能量供给即可实现对系统的调控。其核心机制在于利用压电材料在机械应力作用下产生的电荷或极化响应，将机械能转化为热能或其他形式的能量进行耗散，从而达到减振或调节结构刚度的目的。该方法通过对压电元件的空间布局、边界条件以及耦合强度的精细调整，能够有效提升系统的稳定性和抗干扰能力。由于省去了复杂的驱动电路与实时反馈系统，被动控制在系统集成度、可靠性和经济性方面具有显著优势。受限于材料性能和固有设计约束，其适应性和动态响应范围相对有限，在复杂工况下的控制精度和效果可能难以满足高要求应用场景的需求。因此，被动控制更适合用于对能耗敏感或对控制性能要求适中的工程实践。

### 3.3 混合控制

混合控制通过整合主动控制与被动控制的核心优势，能够在复杂工况下实现性能与能耗的优化平衡。基于结构的具体需求和环境约束条件，混合控制策略能够动态调节两种控制模式的比例关系，从而满足多样化应用场景的要求。在能量受限条件下，该方法利用被动控制的固有耗散特性降低整体功耗，同时借助主动控制的外部调节能力提升系统的响应精度与适应性。这种策略通过机电耦合参数的精细调谐，可有效增强系统非线性或不稳定性环境中的鲁棒性。混合控制通过对传感反馈数据的实时分析与处理，进一步优化了控制律的设计，确保系统在稳定性与动态性能之间达成最优权衡。其设计过程通常涉及多目标优化算法的应用，以兼顾控制效率、能量管理及长期可靠性等关键指标。这种方法不仅拓展了压电智能结构的功能边界，还为工程实践中复杂

问题的解决提供了有效的技术路径。

## 4 理论与实验研究

### 4.1 理论模型的建立

构建压电智能结构的理论模型是实现对其力电耦合特性、分布式传感与控制机制深入理解的关键环节。这一过程需综合运用连续介质力学、压电学以及多场耦合理论,确保模型能够全面反映结构在复杂工况下的响应行为。模型建立过程中,必须充分考虑几何非线性、材料各向异性以及边界条件对结构整体性能的影响,同时兼顾力-电-热等多物理场的相互作用效应。通过引入适当的假设条件和数学工具,可以将复杂的实际问题转化为可求解的形式,从而准确描述结构在外部激励下的动态响应特征。

理论模型的构建还需注重对关键参数的敏感性分析,例如压电材料的机电耦合系数、弹性模量及阻尼比等,这些参数的微小变化可能显著影响结构的输出特性。基于有限元方法的数值仿真技术为理论模型提供了重要的验证手段,其可以通过离散化处理实现对复杂几何形状和异质材料分布的精确刻画。通过对模型预测结果与实验数据的对比分析,可以进一步优化模型参数,提升其预测精度和适用范围,为压电智能结构的设计优化与工程应用提供可靠的理论支撑。

### 4.2 实验研究

实验研究作为理论模型验证与技术优化的核心环节,通过多维度的数据采集与分析手段,能够深入揭示压电智能结构的力电耦合特性及其动态响应行为。在力学行为测试方面,应变片测量技术可精确捕捉结构表面的局部应变分布,为评估材料变形规律提供定量依据;同时,激光多普勒振动测量技术以其非接触、高精度的特点,能够有效获取结构整体的振动模态及频率响应特征。电学特性测试是理解压电元件机电转换性能的关键,包括电压-电流曲线的绘制、阻抗谱分析以及驱动信号的相位关系测量等,这些数据可用于表征压电材料的耦合效率和能量传递特性。

在实验设计中,边界条件的精确控制与加载方式的选择对结果可靠性至关重要。例如,采用动态激励源模拟实际工况下的外部扰动,并结合高速数据采集系统记录瞬态响应,可以更真实地反映结构在复杂环境中的工作状态。通过对比不同参数配置下的实验结果,如压电层厚度、粘贴位置及电路连接方式的变化,能够进一步明确其对整体性能的影响机制。

实验研究与理论建模的紧密结合是推动技术进步的重要途径。通过将实验测得的力电耦合系数、阻尼比

等关键参数反馈至数值模型中,可以显著提升理论预测的准确性。基于实验数据的敏感性分析有助于识别影响结构性能的核心因素,从而为分布式传感网络的设计与控制策略的优化提供科学依据。这种双向互动的研究模式不仅深化了对压电智能结构工作原理的理解,也为工程应用奠定了坚实的实验基础。

## 5 结论

压电智能结构的力电耦合、分布式传感与控制是一个多学科交叉的复杂研究领域。力电耦合是其实现多种功能的核心原理,分布式传感能够为结构状态监测提供丰富的信息,而控制策略则是优化结构性能的关键手段。通过深入的理论研究和实验研究,我们能够不断深入理解这些现象和机制,为压电智能结构在航空航天、土木工程、机械工程等领域的广泛应用奠定坚实的基础。随着材料科学、电子技术等相关学科的不断发展,压电智能结构的研究将不断取得新的突破,其应用前景也将更加广阔。

### 参考文献

- [1]张军,王郁赫,任宗金,等.压电力传感器中晶轴偏转产生的维间耦合研究[J].压电与声光,2023,45(04):614-618.
- [2]周山,刘利平,高建宇,等.三维力传感器静态解耦方法的研究[J].电子测量与仪器学报,2020,34(08):181-187.
- [3]辛明勇,徐长宝,祝健杨,等.基于磁力电耦合效应的电力线路磁场能量采集研究[J].自动化与仪器仪表,2024,(11):43-47.
- [4]周华晨,赵剑,李海洋,等.压电式冲击传感器压电变系数多自由度力电耦合动力学分析与设计[J/OL].机械工程学报,1-10[2025-02-27].
- [5]周海洁,王彩艳,陈玮珑,等.高极性、低模量介电弹性体的合成及力电耦合性能[J].科学通报,2024,69(20):3047-3058.
- [6]赫尧,张振杰,赵金月,等.压电梁式驱动器力电耦合特性的研究[J].内燃机与配件,2023,(21):13-15.

作者信息:李素云,性别女(出生年.月1972.9),民族汉,籍贯广西贺州市,学历硕士研究生,职称教授,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

基金项目: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)》