



飞行器系列丛书

结构半主动振动控制 ——压电同步开关阻尼技术

SEMI-ACTIVE CONTROL OF STRUCTURAL VIBRATION
——SYNCHRONIZED SWITCH DAMPING
TECHNIQUE BASED PIEZOELECTRIC ELEMENTS

季宏丽 裘进浩 赵金玲 著



科学出版社

飞行器系列丛书

结构半主动振动控制

——压电同步开关阻尼技术

季宏丽 裘进浩 赵金玲 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书简要地介绍了压电智能结构振动控制技术的必要性及其发展与应用现状,系统地阐述了压电同步开关阻尼(synchronized switch damping, SSD)半主动振动控制方法的基础理论与应用探索。其中,SSD半主动振动控制系统的机电耦合和能量转换模型、SSD振动控制效果的参数影响规律、提高SSD单模态与多模态半主动振动控制效果与鲁棒性的方法设计、负电容SSD半主动振动控制方法以及非对称SSD振动控制方法等内容是全书的重点。

本书可供从事结构振动噪声控制、压电智能材料与结构等相关专业的工程技术人员参考,也可作为高等院校工程力学、测试计量与技术等相关专业的研究生教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

结构半主动振动控制——压电同步开关阻尼技术 / 季宏丽, 裘进浩, 赵金玲著. —北京: 科学出版社, 2018.6

(飞行器系列丛书)

ISBN 978-7-03-056798-7

I. ①结… II. ①季… ②裘… ③赵… III. ①同步开关-阻尼-技术 IV. ①TM561

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 046102 号

责任编辑: 许 健

责任印制: 谭宏宇 / 封面设计: 殷 靓

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

江苏凤凰数码印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2018 年 6 月第一次印刷 印张: 10

字数: 201 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《飞行器系列丛书》编委会

名誉主任：赵淳生 郭万林 聂 宏

主 任：夏品奇

副 主 任：姚卫星 裘进浩 高存法

委 员（按姓氏笔画排序）：

王立峰 王同光 邓宗白 史治宇 余雄庆 陆志良

陈少林 陈仁良 陈国平 金栋平 赵 宁 胡俊辉

袁慎芳 蒋彦龙

丛 书 序

飞行器是指能在地球大气层内外空间飞行的器械，可分为航空器、航天器、火箭和导弹三类。航空器中，飞机通过固定于机身的机翼产生升力，是数量最大、使用最多的航空器；直升机通过旋转的旋翼产生升力，能垂直起降、空中悬停、向任意方向飞行，在航空器中具有独特的不可替代的作用。航天器可绕地球飞行，也可远离地球在外太空飞行。1903年，美国的莱特兄弟研制成功了人类第一架飞机，实现了可持续、有动力、带操纵的飞行。1907年，法国的科尔尼研制成功了人类第一架直升机，实现了有动力的垂直升空和连续飞行。1957年，人类第一颗人造地球卫星由苏联发射成功，标志着人类由此进入了航天时代。1961年，苏联宇航员加加林乘“东方1号”飞船进入太空，实现了人类遨游太空的梦想。1969年，美国的阿姆斯特朗和奥尔德林乘“阿波罗11号”飞船登月成功，人类实现了涉足地球以外的另一个天体。这些飞行器的成功，实现了人类两千年以来的各种飞行梦想，推动了飞行器的不断进步。

目前，飞行器科学与技术快速发展，各种新构型、新概念飞行器层出不穷，反过来又催生了许多新的飞行器科学与技术，促使人们不断地去研究和探索新理论、新方法。出版《飞行器系列丛书》，将为人们的研究和探索提供非常有益的参考和借鉴，也将有力促进飞行器科学技术的进一步发展。

本《飞行器系列丛书》，将介绍飞行器科学与技术研究的最新成果与进展，主要由南京航空航天大学从事飞行器设计及相关研究的教授、专家撰写。南京航空航天大学已研制成功了30多种型号飞行器，包括我国第一架大型无人机、第一架通过适航审定的全复合材料轻型飞机、第一架直升机、第一架无人直升机、第一架微型飞行器等，参与了我国几乎所有重大飞行器型号的研制，拥有航空宇航科学与技术一级学科国家重点学科。在这样深厚的航空宇航学科基础上，撰写出并由科学出版社出版本套《飞行器系列丛书》，具有十分重要的学术价值，将为我国航空航天界献上一份厚重的礼物，将为我国航空航天事业的发展作出一份重要的贡献。

祝《飞行器系列丛书》出版成功！

夏品奇

2017年12月1日于南京

前 言

振动噪声控制是机械结构和实际工程应用中需要考虑的问题,杆、梁、板等作为各类装备和工程结构的基本组成构件或部件,是产生和传递振动与噪声的主要载体及导体。因此,针对各类工程结构的减振降噪研究,是机械工程、声学、力学乃至土木工程等多学科领域广泛关注的重要基础问题。振动控制方法大致分为两类:主动方法和被动方法。主动方法虽然控制效果好、适用频带宽,但需要外部提供能量,系统功耗大、质量重,且实现起来比较复杂。现有的被动方法大多采用阻尼材料和隔振器等对振动进行削弱或隔离,这对中高频振动噪声的控制极为有效,但对于低频段,被动方法控制效果很差,控制频带很窄,且系统体积庞大,质量重。

航空航天、土木工程、交通运输等领域的飞速发展,对振动控制系统提出质量轻、频带范围宽、自适应能力强等要求,传统的主动、被动方法难以适应其快速发展的步伐,不能满足设计要求。特别是在当前我国“全面提高重大装备技术水平”的国家战略发展需求下和人民日益增长的美好生活需求下,更有必要大力发展结构减振降噪的新理论、新方法和新技术。在这种新的时代背景下,各种各样的半主动控制方法应运而生。待百花齐放式的控制方法竞相涌现,振动噪声控制水平离我们的要求就不远了。

基于压电的同步开关阻尼(synchronized switch damping, SSD)半主动控制方法是半主动控制的一种,最先由法国里昂国立应用科学学院的 Guyomar 等提出。SSD 半主动控制方法是在压电主动控制和压电被动控制的基础之上发展起来的,它的出现不仅克服了主动控制系统复杂、能量供给系统庞大的缺点,同时弥补了被动控制低频能力差、鲁棒性低等不足。基于压电的同步开关阻尼半主动控制方法刚开始并没有那么神奇,但是经过科学家几十年来的不懈努力,半主动控制的应用范围才逐步扩大,并走向成熟。

作者所在课题组自 2000 年起开展压电同步开关阻尼半主动控制的基础理论研究,建立了较为完整的理论模型,提出了包括负电容、非对称等多种半主动控制方法,并结合工程应用对象,开展了半主动控制方法在结构减振降噪领域的应用探索研究。本书将课题组十几年来在该领域的研究进展进行提炼和整理,同时广泛参考国内外具有代表性的最新研究成果,以作为科研参考之用。

本书共八章,各章内容大致如下:第 1 章为绪论;第 2 章介绍基于解析模态

分析法的压电智能结构建模方法；第3章阐述基于压电元件同步开关阻尼技术的半主动控制方法的原理；第4章介绍提高SSD的半主动控制效果和鲁棒性的几种方法；第5章着重介绍一般情况下的SSD能量转换以及开关切换参数对控制效果的影响关系；第6章介绍提高SSD多模态振动控制的几种方法；第7章介绍基于负电容的同步开关阻尼半主动控制方法和参数影响规律；第8章针对压电元件的固有非对称极化特性，介绍了非对称同步开关阻尼半主动控制方法。

在近20年从事半主动控制的研究过程中，作者先后得到国家自然科学基金、国防预研项目、航空科学基金、博士后特别资助基金、江苏省青年基金等资助，在此表示由衷的感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

2018年1月

目 录

丛书序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 智能材料与结构	2
1.2.1 智能材料与结构的定义	2
1.2.2 智能材料与结构的发展	3
1.3 基于压电智能结构的振动控制	3
1.3.1 被动控制方法	4
1.3.2 主动控制方法	7
1.3.3 半主动控制方法	10
1.4 本书内容和章节安排	12
1.5 参考文献	13
第 2 章 压电智能结构的建模	16
2.1 压电方程	16
2.1.1 压电功能元件的本构方程	16
2.1.2 特定力学条件下的压电方程	18
2.2 压电材料的机电耦合系数	19
2.3 压电梁的振动	21
2.3.1 压电梁的运动方程	21
2.3.2 压电梁的模式运动方程	26
2.4 压电板的振动	29
2.4.1 压电板的运动方程	29
2.4.2 压电板的模式运动方程	33
2.5 压电智能结构的基本特性	35
2.5.1 电学边界条件对压电结构刚度与固有频率的影响	35
2.5.2 结构机电耦合系数与机械品质因子	36
2.6 压电智能结构的状态空间模型	37
2.6.1 使用压电传感器的状态方程	37
2.6.2 使用位移传感器的状态方程	38

2.7	压电智能结构的振动响应	39
2.8	结构模型参数的实验测试方法	41
2.9	参考文献	42
第3章	同步开关阻尼半主动方法的控制原理	44
3.1	SSDS 控制方法 ^[13, 14]	44
3.2	SSDI 控制方法 ^[7, 14]	46
3.3	SSDV 控制方法 ^[9, 14]	48
3.4	振动控制实验验证	50
3.4.1	实验装置	50
3.4.2	三种方法的控制效果比较	50
3.5	参考文献	53
第4章	自适应 SSDV 半主动控制方法	54
4.1	改进的 SSDV 技术 ^[1]	54
4.2	基于位移梯度的自适应 SSDV 方法 ^[2]	55
4.3	基于 LMS 算法的自适应 SSDV 方法 ^[4]	55
4.3.1	LMS 算法原理	56
4.3.2	LMS 算法在自适应 SSDV 中的应用	57
4.4	振动控制实验验证	58
4.4.1	传统 SSDV 的控制效果	58
4.4.2	改进的 SSDV 的控制效果	59
4.4.3	基于位移梯度的自适应 SSDV 的控制效果	59
4.4.4	基于 LMS 算法的自适应 SSDV 的控制效果	61
4.5	参考文献	63
第5章	任意开关切换下的能量转换	65
5.1	特定条件下切换参数对控制效果的影响	66
5.1.1	切换相位对控制效果的影响	66
5.1.2	切换频率对控制效果的影响	67
5.1.3	随机切换时的控制效果	73
5.2	一般条件下切换参数对控制效果的影响 ^[11]	76
5.2.1	压电元件上切换电压的一般形式	76
5.2.2	简谐振动下的开关切换电压一般形式	79
5.2.3	切换频率对 SSD 控制中能量转换的影响	82
5.2.4	切换频率对 SSDI 控制效果的影响	86
5.2.5	切换频率对 SSDV 控制效果的影响	88
5.3	参考文献	89

第 6 章 SSD 多模态振动控制方法	91
6.1 多模态系统的总机电转换能量	91
6.2 多模态开关控制方法	95
6.2.1 基于位移阈值的多模态开关控制方法	95
6.2.2 基于能量阈值的多模态开关控制方法	95
6.2.3 控制效果验证	96
6.3 不同频率比和幅值比对机电转换总能量的影响 ^[15]	101
6.3.1 传统极值切换下的机电转换总能量	101
6.3.2 减少极值切换下的机电转换总能量	104
6.4 不同频率比和幅值比对每个模态转换能量的影响	107
6.4.1 每个模态的机电转换能量方程	107
6.4.2 传统开关下的每个模态的机电转换能量	109
6.4.3 改进开关下的每个模态的机电转换能量	110
6.5 参考文献	113
第 7 章 基于负电容的同步开关阻尼半主动振动控制方法	115
7.1 SSDNC 控制电路	115
7.2 SSDNC 控制原理	117
7.2.1 压电元件上电压的瞬态响应	117
7.2.2 初次开关切换前后压电元件上的电压	118
7.2.3 压电元件上电压的稳态响应	119
7.2.4 控制系统的稳定性分析	120
7.2.5 最优控制下的能量转换	120
7.2.6 最优控制下的控制效果	121
7.2.7 控制效果的实验验证	122
7.3 切换频率对控制效果影响	123
7.3.1 切换频率对电压的影响	124
7.3.2 切换频率对能量转换的影响	126
7.3.3 切换频率对控制效果的影响	130
7.4 参考文献	133
第 8 章 非对称同步开关阻尼半主动振动控制方法	135
8.1 非对称半主动振动控制电路 ^[4]	135
8.2 非对称半主动振动控制原理	136
8.2.1 控制过程中的电压变化	136
8.2.2 电压非对称比例系数	142

8.3 非对称同步开关阻尼半主动振动控制实验验证 ^[4]	144
8.3.1 控制电压.....	144
8.3.2 控制效果.....	146
8.4 参考文献.....	148

第1章 绪 论

1.1 引 言

振动和噪声品质是衡量现代装备发展的一个重要技术指标。近年来,在我国国民经济领域,以空天运载工具、大型飞机、高速列车、大型发电机组、高档数控机床等为代表的各类重大装备的自主研发被提升到国家战略发展的高度。这些重大装备正日益向高速、重载、大型、轻质、柔性和极端运行环境等方向发展,由此带来更为严重的振动与噪声问题,已经成为制约我国重大装备性能提升的重要因素。在我国国防工业领域,潜艇、战机、军舰、战车、导弹等武器装备面临的振动与噪声问题非常突出。这些武器装备的工作环境恶劣,产成的振动与噪声非常剧烈,降低了装备的战场生存能力。此外,这些武器装备都装载了大量的精密仪器仪表,剧烈的振动与噪声将使仪器仪表的性能、精度降低,甚至失效,进而影响装备的作战性能。从一定程度上讲,民用重大装备和当代武器装备的迅猛发展,将减振降噪技术的需求和要求都推向了高峰^[1]。

杆、梁、板等工程结构作为各类装备的基本组成构件或部件,是产生和传递振动与噪声的主要载体及导体。因此,针对各类工程结构的减振降噪研究,长期以来都是机械工程、声学、力学乃至土木工程等多学科领域广泛关注的重要基础问题。振动控制方法大致可以分为两类:主动方法和被动方法^[2-7]。主动方法一般需要外部提供能量,系统比较复杂,离实用化还有一定的距离,所以目前工程结构中普遍使用的是被动方法。现有的被动方法多采用阻尼材料对振动进行削弱,但随着对民用飞机的舒适性、军用飞机的隐身性能等要求的不断提高,现有的被动方法已经不能满足设计要求。特别是在当前我国“全面提高重大装备技术水平”的国家战略发展需求下,更有必要大力发展结构减振降噪的新理论、新方法和新技术。

智能材料的概念在 20 世纪 80 年代末被首次提出,随着硬件设备的发展,各式各样的新型智能材料交叠更换。智能材料发迹于航空航天领域,现已发展至服饰艺术、医疗器械、土木工程等各个领域^[8-15]。21 世纪以来,以功能材料为基础的智能材料受到世界科技强国的重视。智能材料与结构的研发和应用掀起了智能时代的新篇章,也为结构减振降噪的理论和突破提供了新的契机与解决途径。

1.2 智能材料与结构

1.2.1 智能材料与结构的定义

传统结构是被动的，受到扰动或激励时，会产生响应，如图 1.1 (a) 所示，而响应完全取决于系统本身的动力学、静力学特性。为了进一步提高系统的性能，提出了智能结构的概念。智能结构自提出以来，获得众多研究学者的关注。它是将传感器、驱动器、控制器等集成或融合在基体材料中，组成一种新的材料或结构，使之具有自诊断、自适应、自修复等“智能功能”，实现结构健康监测、减振降噪和智能传感等作用，从而延长结构寿命，提高结构性能，如图 1.1 (b) 所示。智能结构是一门涉及材料、电子、机械工程、化学等多学科交叉的综合科学。

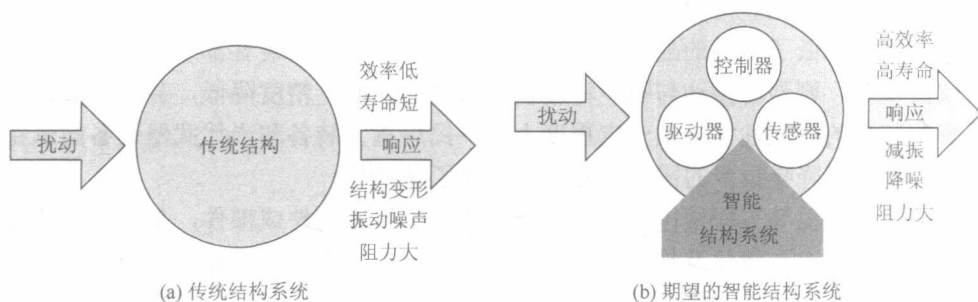


图 1.1 结构响应系统

目前，国际学术界关于智能材料与结构有关名称的定义尚不统一，但一般认为智能材料系统都应该由传感、处理、执行三个主要部分构成。一般来说，智能材料是能够感知环境变化（即传感功能），通过自我判断（即处理的功能）来实现自我执行（即执行功能）的新型功能材料。从仿生学角度来看，智能材料与结构相当于一个由骨骼、感官和神经、肌肉及大脑组成的系统^[9]：

- (1) 基体材料和结构——人体的骨骼；
- (2) 传感功能元件——人体的感官和神经；
- (3) 驱动功能元件——人体的肌肉；
- (4) 处理和执行芯片——人的大脑。

从工程角度来看，智能材料与结构是一类具有感知、驱动和控制功能的材料、结构系统，它代表一种全新的材料、结构、功能一体化的设计思想^[13]。

1.2.2 智能材料与结构的发展

在各种工程应用中,航空领域最早开展智能材料与结构的研究。1984年前后,美国陆军科研局给予旋翼飞行器技术研究赞助,研究目的是减小旋翼桨叶的振动和扭曲。美国空军着重于航空和航天飞行器智能表层的研究,它被认为是亟须发展的、具有原创性的项目。随后,美国空军莱特研发中心下属的航空设备实验室又规划了相应的智能表层的发展路线图。1988年以后,美国各大学和航空航天公司、研究所等机构都参与研究,他们研究范围广泛,且取得了创造性的进展。同时,美国国防部的边缘科学研究规划(代号 UR1)、陆军科研局和海军科研局等部门都给予智能材料与结构研究人员一定的赞助。UR1 资助课题包括材料科学、结构方程推导、单一和复合智能结构的数学模型研发、传感器与驱动器、控制系统和处理方法、多体结构动力学、结构识别和气动弹性修正等诸多方面。陆军科研局的规划侧重于旋翼飞行器和地面运输装置,如减小结构件的振动、增大气动力学稳定性、加强旋翼飞行器的控制能力与损伤的检测、减轻和修理损伤部分。海军科研局的规划则侧重于水中潜艇噪声强度的控制。

20 世纪 90 年代,智能材料与结构的研究在多方面取得了初步成就。自 1998 年在美国弗吉尼亚大学召开关于“智能材料结构和数学问题”的专题学术讨论会以来,智能材料结构技术的研究已经成为材料科学与工程的热点之一,且很快被土木工程、船舶、海上陆架、汽车、医学等行业看中,认为它将会引起这些行业的新技术革命。

在日本科学技术厅的主持下,日本继美国之后开展了智能材料与结构的研究。同时,日本与美国联合组成专门研究小组,在智能材料方面(特别在自适应结构方面)已取得很大进展。接着,澳大利亚、欧洲、亚洲等国家和地区也积极开展智能材料与结构的研究。21 世纪以来,研究遍及世界各国,它将信息与控制技术融入材料本身的物理特性中,其研究成果影响到信息、电子、生命科学、宇宙、海洋科学技术等领域。目前,智能材料与结构的研究范围和涉及的行业仍在不断扩大,它的研究与开发孕育着新一代的技术革命,被认为是最有前途的未来技术之一。

当前,智能材料与结构在航空、航天飞行器上的典型应用主要有智能蒙皮、自适应机翼、振动噪声控制和结构健康监测等。

1.3 基于压电智能结构的振动控制

作为一种重要的智能材料,压电材料具有正、逆压电效应^[16]。利用其压电效

应把压电材料制作成传感器和驱动器,再施加以一定的控制策略,可以实现结构的智能化。另外,压电材料还具有体积小、质量轻、适用频带宽、机电转换效率高优点,使其在诸多智能材料的研究中受到重视。振动和噪声控制是一个兼具研究价值和关注度的领域^[17-19],使用压电材料作为传感器和驱动器对结构进行减振降噪控制是智能结构研究的一个重要方向。

国内外学者针对压电材料的减振降噪技术已经开展了几十年的研究,并提出多种减振降噪新方法。依据是否需要外界能源,结构控制可分为被动控制、主动控制、半主动控制三类,具体分类如图 1.2 所示。在不同的控制方法中,压电材料起着不同的作用。依据控制调整方式的不同,结构控制还可以分为开环控制(仅由外界荷载变化调整,被动控制多为此种控制)、闭环控制(即反馈控制,依据结构当前反应值和估计值调整)、开闭环控制(能同时感受外界荷载和结构反应的变化,理想地控制结构振动,但工程实现困难)。振动控制的实质是通过机械能和电能之间的转换,减小结构振动的机械能,从而达到振动控制的目的,其原理图如图 1.3 所示。下文将依次介绍被动控制、主动控制以及半主动控制三种技术的原理和发展现状。

1.3.1 被动控制方法

基于压电材料的被动控制技术,指的是在被控结构上粘贴或埋入压电材料,利用压电材料的正压电效应,由压电元件感受由振动产生的结构应变,将振动机械能转变为电能,通过在压电元件两端串联合适的外部分支电路,来耗散或吸收由结构振动产生的机械能,从而达到减振降噪的目的。被动控制也称为无源控制,它不需要外部输入能量,仅通过控制系统改变结构系统的动力特性,达到减轻动力响应的目的。由于不需要各种控制器、传感器或滤波器,被动控制系统非常简单,在实际工程安装中比主动控制系统更加便捷,对于特定的被控结构,通常控制效果比较稳定。

最有效的被动控制方法是调整外部分支电路中的电阻和电感,使压电系统的谐振频率与受控结构的某阶固有频率一致,从而实现对该阶模态的振动进行控制。基于压电分支电路的被动控制概念于 1979 年由 Forward^[20]首先提出,通过设计由压电元件和电感构成的回路,实现了抑制金属梁振动的目的。1991 年, Hagood 和 Flotow^[21]就不同压电分支电路建立了相应的计算模型,结合大量实验,使得该方法得到长足的发展。最初的压电被动控制通过 RLC 谐振电路来消耗电能,达到振动控制的目的(其中 R 为电阻、L 为电感、C 为压电元件的电容)。但是这种方法存在三个主要的弊端:一是电感和电阻的选择受环境的影响非常大,当共振频率漂移或压电特性改变时,就要重新选择合适的电感和电阻,否则控制效果会大

大削弱；二是低频振动往往需要较大的电感值，实现起来比较困难，因为铁芯的增加和线圈匝数的增多会导致系统质量增加、结构庞大，且很难得到具有精确电感值的电感元件；三是随着振动模态数量的增加，分支电路将变得非常复杂，且分支电路中电阻电感的参数将更加难以优化。因此，这种形式的振动控制技术比较适合用于高频的单阶振动控制；另外，这种方法通用性差，通常对参数相对固定的系统才能有较好的控制效果，如果系统参数发生变化，将会影响控制性能，鲁棒性较差。

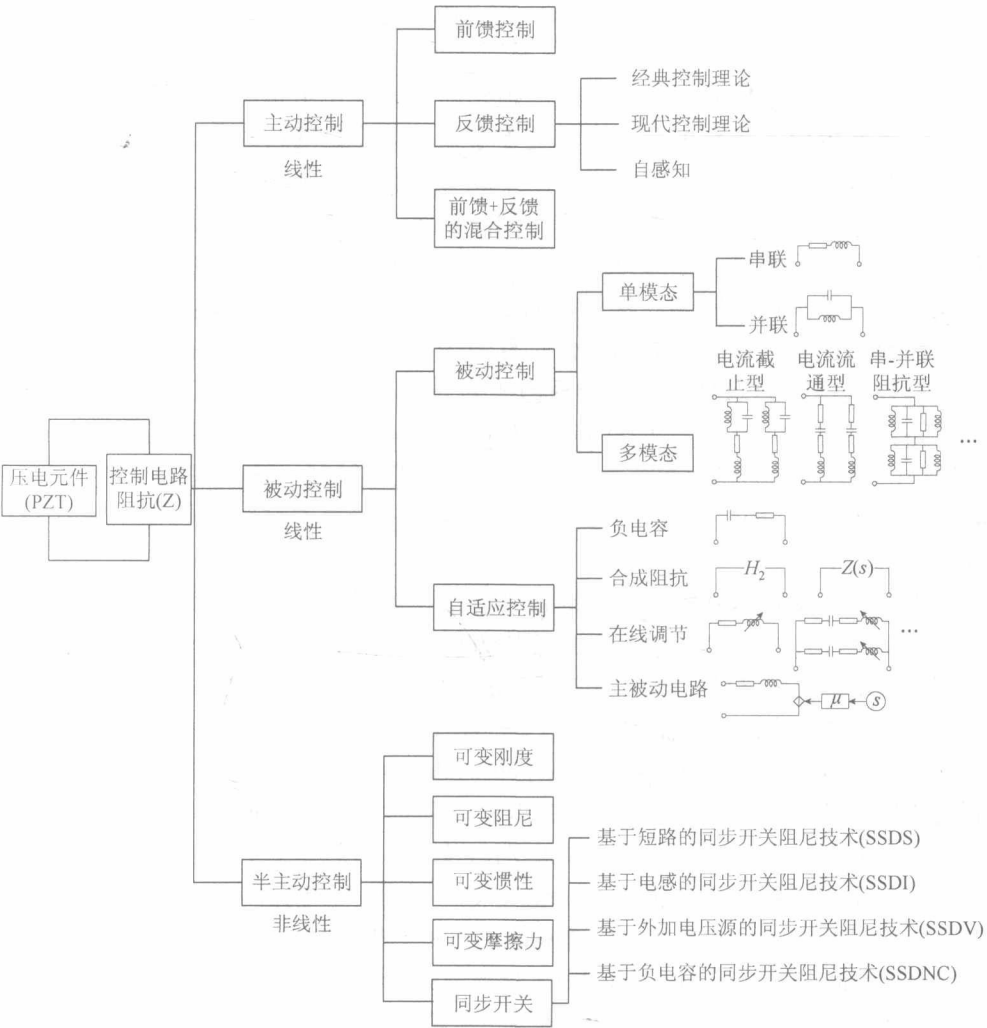


图 1.2 基于压电元件的振动控制方法分类

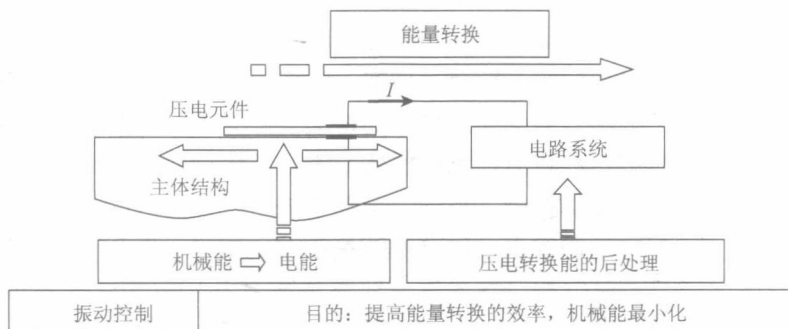


图 1.3 振动控制原理

然而，实际结构的振动往往是多模态的。如果使用传统的单模态被动控制方法，需要采用多个压电元件，构造多个被动分支电路，对每个振动模态进行分别控制。这势必造成系统庞大，难以调节，也会增加结构质量，因此需要利用少数的压电元件实现对多个模态的同时控制。Hollkamp^[22]提出采用特定电路对多个模态进行控制，但该方法需要与可控模态数量相同的分支电路相结合，才能对多个模态进行控制，且需要优化算法对回路中每个分支电路参数同时优化，这导致优化问题高度的非线性；且由于各个模态的相互影响，要实现对各个模态控制回路的同时调节是十分困难的。为此，Wu^[23]提出了相关电流截止型电路，利用 LC 电路的并联谐振来隔断某一阶频率信号，而让其他频率的信号通过，相当于一个带阻滤波器。对于 n 阶多模态控制，需要在每个支路上串联 $n-1$ 个阻塞电路。随后，研究者又提出多种多模态分支电路，如电流流通型、串-并联阻抗型等。

为了提高被动控制策略的鲁棒性，国内外学者提出一系列方法。Hollkamp 和 Starchville^[24]首先提出以结构振动位移均方根值 (RMS) 最小化为指标调节串联电阻和模拟电感值的方法，但这种方法系统结构复杂，需要很多高压电子元件，不宜对超过两个模态的多频振动进行控制。瑞士联邦科技学院的 Dominik^[25]推导出一种基于相对相位的自适应 (relative phase adaptation) 调节分支电路谐振的技术，利用 RLC 回路达到谐振时电源电压和电感两端电压相差 90° 这一特性来调节回路中的电感值。采用这种技术控制电路较简单，收敛较快，但需要在结构背面另贴一块压电元件作为传感器。Fleming 等^[26]将数字滤波器的概念引入自适应控制中，通过构造数字滤波器的传递函数，其和一些运算放大器一起组成虚拟合成阻抗 (synthetic impedance)，如图 1.4 所示，其中 U_a 表示激励电压， U_p 表示压电元件电压，通过调节传递函数的分子分母系数可以改变虚拟合成阻抗电路的阻抗或导纳值，运算放大器芯片作为电压控制电流源或电流控制电压源来使用。虽然这种方法不需要其他传感器，但是收敛较慢，且收敛速度易受外界干扰影响。