

基于压电效应的噪声控制研究进展

张文群, 吴新跃, 张 萌

(海军工程大学船舶与动力学院, 武汉 430033)

摘要: 对噪声主动控制技术、杂交阻尼技术、压电分流阻尼技术及压电阻尼复合材料等方面的国内外研究概况进行了综述,通过现状分析,指出需要进一步发展成熟的流、固、声及电的多重耦合有限元分析方法;认为采用压电分流阻尼技术,以及与高分子阻尼材料及一些消声结构的结合,可以有效控制低频及宽频带噪声;压电阻尼复合材料的消声机制中,应该考虑微粒局域共振产生的消声作用,需进一步深入其基础理论。

关键词: 噪声控制;压电技术;阻尼

中图分类号: TB53;O482.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-04-0577-07

Development of noise control utilizing piezoelectric technology

ZHANG Wen-qun, WU Xin-yue, ZHANG Meng

(College of Ship and Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The development of piezoelectric noise control technology in recent years, including active noise control, hybrid damping technology, piezoelectric shunting technology and piezoelectric damping composite materials etc, is reviewed. It is revealed that the method of fluid, solid, sound and electric coupled multi-physics finite element should be further developed. Piezoelectric shunting technology and its combination with some polymer damping materials, or noise attenuation structures, can be effectively used to control low frequency and broad band noise. On piezoelectric damping composite materials, the local resonance of particles should be considered in its mechanism of noise attenuation, and the basic theory needs to be further studied.

Key words: noise control; piezoelectric technology; damping

1 引 言

噪声污染严重危害人类身体健康,噪声控制问题一直是声学界研究的热点。噪声控制一方面从源头控制结构噪声的产生,如采用振动噪声隔离技术、结构敷设约束阻尼层等,控制结构噪声的产生和传播;另一方面,对于传输中的声波,采用隔声材料或结构进行隔声处理,对需要吸声的场合,采用微穿孔结构、多孔材料或阻尼吸声材料等^[1]。

目前,基于压电效应^[2]的噪声控制正得到广泛

的研究和关注,众多学者开展了噪声的主动控制、杂交阻尼噪声控制、基于压电分流阻尼技术的噪声控制以及压电复合阻尼材料吸声等方面的研究。本文概述了近年来这一领域的研究进展,讨论了需要进一步研究的问题,并提出了一些新的设想。

2 基于压电效应的噪声主动控制

由于结构本身是声源或声源由结构包围着,声源能量传递给结构,再通过结构辐射出去。因此通过对结构振动的主动控制,有可能控制噪声传播。在噪声主动控制中,利用压电材料的正压电效应制成的振动传感器,与利用其逆压电效应的作动器相结合,与控制电路一起可形成压电噪声控制智能结构或自适应结构。

利用压电效应有效控制结构噪声的前提是建立流固耦合方程、机电耦合方程、检测方程和作动方程。

收稿日期:2007-12-10;修回日期:2008-03-12

基金项目:中国国家自然科学基金(50605062)、中国博士后科学基金项目(20070410928)资助。

作者简介:张文群(1973-),男,江苏泰兴人,博士后,研究方向为振动、冲击与噪声。

通讯作者:张文群,E-mail:wenkun@sina.com

流固耦合系统具有相当的复杂性,邢景棠^[3]等曾对流固耦合力学进行了概述。对于压电耦合系统的系统性研究,胡选利等^[4]建立了机电耦合系统的动力分析模型,给出了模态分析和有限元分析的耦合系统方程、检测方程和作动方程,林启荣等^[5]在其综述中对上述问题作了回顾。结构噪声主动控制的研究主要集中在腔室有源消声、板梁噪声辐射控制及水下噪声传播控制等方面,研究的重点在于耦合方程的建立、控制算法的设计、压电片位置优化及压电片刚度的影响等。

在腔室有源消声方面:采用压电材料的有源消声,不但可以使低频噪声得到控制,而且相比于电磁喇叭有源消声,其质量及占用体积小,使其在航空、航天、汽车等领域有广泛的应用前景。Banks^[6]对三维空腔的噪声主动控制进行了研究,其空腔为一边为梁,其它三边为刚性壁,通过贴在梁上的压电激励器施加纯弯矩来控制,模型简化为 Euler-Bernoulli 梁,通过 LQR 控制器达到控制噪声的目的;Sun^[7]研究了两端简支的外径表面带压电体的圆柱壳内噪声的控制,建立圆柱壳的控制方程、壳内声压波动方程、壳内空气与圆柱壳边界耦合方程,利用最小平方根控制算法获得了控制电压,在其分析中,压电材料对壳体的刚度和质量的影响采用作用力等效。耿厚才、饶柱石等^[8-10]对复杂封闭空间结构声辐射的有源消声机制进行了研究,指出在一般情况下,空腔内噪声的降低由两个弹性板的模态重组来实现;当扰动频率为顶板的一个固有频率时,有源消声则由顶板模态幅值抑制和底板模态重组的共同作用来完成,结合理论分析与有限元方法提出了一种建模新方法,并对压电片的位置进行了优化。Kimball^[11]指出压电有源消声对载人航天飞机具有特别的意义,他采用状态空间法对系统进行分析设计,设计的消声系统试验测试对 200Hz~300Hz 的频带可衰减 3.7dB 左右;Hirschs^[12]采用一种压电智能板作为次级声源对飞机舱内噪声进行主动控制,实验表明其全域的声压级可降低 15dB 左右。

在板梁声辐射控制方面:Fuller^[13,14]从解析和实验两方面通过直接施加主动点激励力到板上,对窄带宽噪声进行控制,此工作由 Clark 和 Fuller 等进一步深入研究^[15],利用压电作动器得到了同样的结果。Frampson^[16]等把四边简支板的位移和流体压力通过特征函数展开,并表示成状态方程,利用压电换能器(既为作动器又为传感器),采用常增益反馈对受对流作用的板的噪声进行控制。Gardonio^[17-19]在一块薄铝板上均匀放置了 16 对压电加速度传感器和压电作动器,采用简单的单通道速度反馈控制器,理论研

究及实验均表明,对空腔声源和激励力点源均获得了良好的消声效果。Nguyen^[20]研究了 PZT 作动的振动梁的声辐射,分析了压电、机械、声之间的耦合特性,采用有限元对其进行了数值模拟。

在水下声传播控制方面:上世纪九十年代初, Bao 等^[21]提出压电材料水下降噪的想法,并对降噪模型的构造及压电控制电路等问题进行了初步的探讨。随后, Hawarth 等^[22]在一维水管中作了模型实验,证实了该方式减噪的可行性;Kim 等^[23]采用混合数值方法分析了嵌有小块压电材料的无限长钢板在液体载荷下对声波的反射。赵汉中^[24,25]采用 Tomason-Haskell 矩阵法建立了无限长压电复合层板上反射压强与压电层电位之间的函数关系,采用边界积分及有限差分法分析了有限长压电复合层板在液体载荷下的声波反射;Scandrett^[26]则分析了液体载荷下压电复合层球壳的声波反射,探讨了流场中声波压力与压电壳体中有关电参数之间的关系。杨昆等^[27]则对水下压电/弹性材料复合层球壳声波反射的数值研究,表明在压电层中加载适当的电压可以在一个圆锥形的流体区域内有效地减小壳体对于外来声波的反射,并且有可能完全消除任意选定空间点上的反射。Sheng^[28]则采用有限元模型,结合一维剪切变形理论,对流体载荷作用下的薄板声辐射进行了数值模拟。

3 噪声控制的压电杂交阻尼技术

基于压电效应的噪声主动控制技术进展迅速,但噪声的主动控制有其固有的缺点:噪声的主动控制基本上是通过结构振动主动控制或外加主动声源实现的,对于结构振动的抑制需要外界提供足够的能量,而且系统的结构复杂,控制系统硬件的误操作(或者故障)有时会使系统完全丧失主动噪声控制作用。为此,结合主动噪声控制及被动约束阻尼层技术,形成了振动噪声的杂交阻尼控制技术。杂交阻尼控制技术相比于主动控制技术,具有更高的可靠性、更宽的控制频带,且需要的控制能量少,还可消除不确定性控制溢出。对结构振动的杂交阻尼控制有大量的文献进行了讨论,刘天雄^[29]、杜华军^[30]等总结了采用压电和黏弹性材料的杂交阻尼控制技术的研究进展。

而对于噪声控制,Carneal^[31]提出了一种将主动、半主动、被动阻尼相结合的技术以获得宽频率范围的传输损失,在 1kHz~5kHz 范围内,传输损失达到 9.4dB,而且对结构的附加质量很小。Guigou^[32]采用一种多孔泡沫材料与 PVDF 相结合形成智能蒙皮

技术,对飞机舱内噪声进行控制,多孔结构有助于高频噪声的吸收,而压电主动控制对低频噪声吸收有效,采用MIMO的反馈LMS控制算法,明显降低了内部噪声。Wael^[33]对多孔材料采用压电主动约束阻尼层,通过简单的PD反馈控制,以一维剪切变形理论,将三维有限元模型简化为二维,数值分析并实验测试了这种结构的吸声特性,表明低频吸声效果获得很大改善。John^[34]在其博士论文中研究了受湍流边界扰动诱致内部噪声的控制技术,采用多孔泡沫材料与PVDF压电薄膜相结合,形成智能控制单元,研究了湍流诱致板的振动及与内部噪声场的关系,传感器和作动器的设计,控制器的实现等,研究表明,增加主动控制后,在400Hz~800Hz内,声波降低了3dB到5dB,衰减峰值达12dB。

4 基于压电分流阻尼技术的噪声控制

利用压电材料的正压电效应,通过外接电路的方式来消耗振动能量,从而发展出了被动及半主动压电分流阻尼技术,人们研究了其在噪声控制领域的应用。

4.1 压电分流阻尼技术

基于压电元件的压电分流阻尼噪声控制技术,能够在一定程度上对低频噪声进行控制。该技术通过一个外接的电阻或电阻电感或电阻电感电容电路,通过电路中的电阻发热将电能转化为热能消耗掉,从而产生压电分流阻尼,起到抑制机械系统振动并进而达到消声的目的。当采用不同的外接电路参数时,压电分流阻尼电路有不同的阻尼原理:当采用电阻时,压电元件与电阻元件的作用类似于粘弹性材料;当采用电阻电感电路时,形成了压电分流谐振电路,其作用相当于吸能器。该技术由Forward在1979年最早提出^[35],Hagood和Von Flotow于1991年对其进行了里程碑式的定量分析^[36],目前众多学者对此展开了研究^[37-43]。

在噪声控制方面,Kristina^[44]建立并测试了一个由结构与振动诱导的噪声板,采用分布压电片的压电分流阻尼技术与传统敷设阻尼材料的方式进行了声传输损失测试,结果表明,采用压电分流阻尼技术的消声频率比传统阻尼材料可以更低,而且其阻尼部分的质量相比传统材料轻得多,消声量大致相当,特别适合于特定频率的消声。Kim^[45]等研究了采用压电分流阻尼的智能板的声传输损失,他在声管中测试了光板、单层压电分流阻尼板、夹空气层的双层压电分流阻尼板的声传播损失,发现使用吸声材料

和空气夹层可以有效吸收中频噪声,而压电分流阻尼可以降低低频噪声,使用多个压电分流阻尼片可以使一定范围内的低频噪声得到显著降低,有空气夹层的双层板的消声作用更好。Wu^[46]实验研究了采用压电分流阻尼抑制强噪声激励下的F-15战机机腹板的单模态及多模态技术。

压电分流阻尼技术主要应用于悬臂梁的根部和大变形的平面薄板,以扼制平板结构振动的方式来达到消声的目的;电路需要一个大电感,要靠外加合成电路实现;消声作用依靠压电材料的机械能-电能转换和电路的电-热转换二者的乘积决定,故不是很高;特别需要指出的是,压电分流阻尼电路具有一定的谐振频率,因而消声频域范围有限。为拓宽阻尼频域,人们发展了多支路电阻电感分流阻尼技术,但未见在噪声控制上的研究。

4.2 半主动压电分流阻尼技术

在压电分流阻尼技术的基础上,人们又发展了半主动压电分流阻尼技术,在半主动分支电路压电阻尼技术中,系统的被动阻尼特性可以根据反馈控制进行在线调整,从而得到在不同条件下的“最优”阻尼。通常调谐作用可以由输入外部动力来实现,目的仅是改变被动吸能/耗能系统的某些性能。半主动压电分流阻尼技术具有控制结构简单,不需要外界提供很大功率,又能获得较大低频消声带宽的特点。半主动压电分流阻尼技术主要包括电阻调谐型、电感调谐型、电容调谐型及开关转换型。Guyomar^[47]及Faiz^[48]采用一种称为SSD(Synchronized Switch Damping)技术的半主动方法解决结构振动和噪声控制问题,Faiz指出:相比于被动分流阻尼技术,SSD具有自适应环境变化的能力,相比于主动阻尼控制,它不需要复杂的信号处理及大量的能量,Faiz提出了一种基于电压的SSDV技术,使得声波导致的应变与电压产生相位差,从而导致能量的消耗,理论和实验均表明其消声效果好于SSDI技术,并且可以获得较宽的带宽。Davis^[49]采用固态电容调谐方式对飞机舱室的噪声进行控制,实验获得了最大20dB,平均10dB的消声作用。Kim^[50]等研究了一种采用负电容方式的压电分流阻尼技术,这种技术对低频宽频带噪声抑制有明显效果。

5 压电阻尼复合材料

将压电效应与聚合物的黏弹性相结合,即在材料中结合三种组分:聚合物基体,压电材料,导电材

料,可以制备性能更为优越的阻尼材料。在这种复合材料中存在着多种能量转化机制;聚合物的粘弹性行为将部分机械能转化为热能,填料和基体之间以及填料之间的界面摩擦可以损耗部分机械能,压电陶瓷将部分机械能转化为电能,电能再通过导电网络转化为热能。

20世纪90年代,日本学者 Sumita M 等将碳黑加入到压电陶瓷/聚合物压电复合材料中^[51,52],开发出了压电导电减振复合材料,研究了 PZT(PLZT)/碳黑/PVDF 复合体系的阻尼时间常数与导电碳黑体积含量的关系,发现振动频率一定的条件下,电路电阻为 $R=1/\omega C$ (ω :压电陶瓷的振动频率, C :压电陶瓷电容)时,阻尼比最大。Uchino 和 Thomas^[53]的研究也发现,振动衰减最快的阻抗匹配条件为 $R=1/\omega C$ 。Law 等^[54]用并联模型和串联模型来模拟复合材料的减振行为,对其工作机理进行了研究,计算结果表明,复合材料的最大阻尼比为 23%,文中用一套有两个自由度的实验装置证实了所建模型的有效性。

最近几年,国内学者也开始了基于压电效应的吸声阻尼材料研究。蔡俊等^[55]以锆钛酸铅(PZT)压电陶瓷微粉为填料,按一定的体积分数与 PVC 复合制得压电复合材料,经直流高压油浴处理后,用四传感器驻波管测量复合材料的声学性能。测试结果表明,在声频 125Hz~1600Hz 的范围内,极化后的吸声性能增加,而隔声量在低频增加,在中高频(500 Hz 以上)降低。蔡俊^[56]又制备了以不同含量炭黑为导电相的压电导电吸声复合材料,测试分析了复合材料体系的动态力学、电学和声学性能,探讨了压电导电复合材料体系中压电吸声途径的耗能机制。结果表明,添加体积含量 4% 炭黑粉的压电复合材料具有最高的吸声性能,且主要在低频吸声性能得到提高。成国祥等^[57]将压电陶瓷粉末 PZT 分别与环氧树脂和丙烯酸酯共聚物混合,在铝板上制成复合膜,研究了复合膜的动态力学性能以及铝板/复合膜的吸声系数,结果表明,由于压电效应和导电作用,复合膜的低频吸声性能得以提高。贺江平等^[58]对压电阻尼复合材料的研究进行了回顾,指出在过去的压电陶瓷/聚合物复合阻尼材料的研究中,均采用导电填料与聚合物的复合物作为导电通道。因此,在这类材料中,使用了大量的固体填料;由于导电通道的导电率一定,复合材料的阻尼性能具有很强的频率依赖性。贺江平提出了用聚苯胺包覆压电陶瓷粉末、以聚苯胺作为导电通道的新思路,采用不同浓度的盐酸(HCl)掺杂 PANI-PZT 复合物,以

改变包覆物中聚苯胺的导电率,以聚氨酯为基体制备了 PANI-PZT/PU 复合材料,用 DMA 研究了复合材料的阻尼性能。实验及理论分析表明,通过原位聚合包覆的方法能够制备 PANI 包覆的 PZT 粉末; PANI-PZT/PU 复合材料的阻尼性能与 PANI 的导电率有关,在一定的导电率下阻尼性能达到最大,这为制备适应宽频振动的压电陶瓷/聚合物阻尼材料提供了可能。

6 现状及思考

综上所述,基于压电效应的噪声控制技术在噪声源、传播途径控制等方面均得到了应用。压电噪声主动控制主要通过压电振动主动控制抑制噪声产生,或通过合适位置外加压电作动器,形成次级声源,使得舱室噪声、板梁噪声辐射、水下壳体噪声辐射获得降低,达到消声效果;压电杂交阻尼控制及压电分流阻尼技术主要用于板壳的隔声,通过抑制结构的振动,从而抑制噪声的产生与传播;压电阻尼复合材料结合几种吸声机制,可用于宽频吸声。

压电噪声控制的研究一直追随振动控制技术,但噪声因其流体与结构的相互耦合振动而产生,在传输中又具有波的特征,压电材料又导致了力电的耦合,由于不同的本构关系,材料的各向异性,力电耦合,流固耦合及复杂的力学和电学边界条件,压电噪声控制的研究困难更大。对忽略流体与结构的相互耦合、忽略压电材料对结构刚度和质量的影响的研究均有局限性,而往往这种多重耦合和刚度及质量的影响无法用解析方法解决,只有通过有限元等数值方法进行分析,但是现在的商用有限元软件对这种耦合问题解决能力相当有限,发展通用的能解决这种复杂耦合的压电噪声控制有限元程序很有必要。

无疑,压电噪声主动控制技术表现出了其优异的性能,但主动控制技术的固有缺点却在一些领域限制了其使用,采用压电分流阻尼技术可以对低频噪声控制,为低频消声提供了一种新的方法,但如何抑制多个模态振动,拓展其低频消声带宽,仍是众多学者研究的热点。

将压电分流阻尼技术与高分子阻尼材料或吸声材料在结构上结合,可以有效拓宽噪声控制频带。压电分流阻尼技术对抑制低频噪声是有效的,而高分子阻尼材料及一些吸声结构对高频噪声控制是有效的,这两种方式的结合有助于拓宽噪声控制频带,但这项技术在噪声控制领域研究较少,是值得关注的

研究方向。

压电阻尼复合材料研究进展较为缓慢,需要从其材料结构、消声机制上重新考虑。压电阻尼复合材料采用的电阻型压电分流阻尼技术,相比于电感支路型等方式,其消声频带窄,阻尼性能低,当其与高分子阻尼材料及导电材料相结合时,导电材料粒子与导电填料粒子之间的距离必须适当,过小或过大的距离都不利于电能的转化,从而不利于阻尼性能的提高。而这种“适宜”的微观分布实际上是难以控制的,而且过高的固体含量又可能使基体的某些其它性能如高频阻尼性能变坏。在已有的文献中,压电阻尼复合材料表现出了一定的低频消声作用,但压电阻尼的份额占据多少是值得研究的,作者考虑,在高分子材料中填入较重的微粒材料,由于微粒材料的局域共振现象^[60],同样可以对低频振动噪声进行抑制,而且不同材料及尺寸颗粒的加入,拓宽了低频消声带宽,这种低频阻尼特性有时比压电分流低频阻尼特性表现得更为明显,因此对这种压电复合材料的消声机制需要更为充分的研究。这也可能是近年来压电阻尼复合材料研究进展缓慢的原因之一。

7 结 论

作为一种功能材料,压电材料在噪声控制领域的研究取得了大量有价值的成果,主动控制技术、杂交阻尼技术、压电分流技术及压电复合阻尼材料等一系列技术的提出,丰富了噪声控制可选择手段,一些技术也已进入实际应用阶段。但需要研究的问题依然很多,如成熟的流、固、声及电的多重耦合有限元分析方法;压电分流阻尼技术的低频宽频带噪声控制方法;与高分子阻尼材料及一些消声结构的结合,有效拓宽消声频域的方法和手段;压电阻尼复合材料的材料结构与阻尼性能、消声机制等的基础研究,这些问题的研究将会进一步深入压电噪声控制的基本理论,拓宽其适用范围,发挥其民用及军用价值。

参 考 文 献

[1] David A B, Hansen C H. Engineering noise control[M]. London: Spon Press, 2003.
 [2] 张福学. 现代压电学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
 ZhANG Fuxue. Modern piezoelectric[M]. Beijing: Science Press, 2003.
 [3] 荆景棠, 周盛, 崔尔杰. 流固耦合力学概述[J]. 力学进展,

1997, **27**(1): 19-38.

XING Jingtang, ZHOU Sheng, CUI Erjie. A survey on the fluid-solid interaction mechanics [J]. Advances in Mechanics (S1000-0992), 1997, **27**(1): 19-38.

[4] 胡选利, 唐永杰. 采用压电机敏元件进行结构振动控制[J]. 应用力学学报, 1997, **12**(4): 51-54.

HU Xuanli, TANG Yongjie. Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structure[J]. Journal of Applied Mechanics(S1000-0992), 1997, **12**(4): 51-54.

[5] 林启荣, 刘正兴, 李红军. 噪声控制压电智能系统研究的现状和展望[J]. 力学季刊, 2000, **21**(1): 27-31.

LIN Qirong, LIU Zhengxing, LI Hongyun. A review on the application of piezoelectric intelligent structures in noise control[J]. Chinese Quarterly of Mechanics (S0254-0053), 2000, **21**(1): 27-31.

[6] Banks H T, Silcox R J, Smith R C. Modeling and control of acoustic Structure interaction problems via piezoceramic actuators: 2-D numerical examples[J]. Journal of Vibration and Acoustics(S1048-9002), 1994, **116**: 386-396.

[7] SUN J Q, Norris M A, Rosset D J, et al. Distributed piezoelectric actuators for shell interior noise control[J]. Journal of Vibration and Acoustics(S1048-9002), 1996, **118**: 676-681.

[8] 耿厚才, 饶柱石, 韩祖舜, 等. 复杂封闭空间结构声辐射的有源消声机制[J]. 声学学报, 2001, **26**(5): 440-444.

GENG Houchai, RAO Zhushi, HAN Zhushun, et al. Active control mechanism of structure-borne noise in an irregular enclosure[J]. Acta Acustica(S03710025), 2001, **26**(5): 440-444.

[9] 王晓峰, 饶柱石, 耿厚才. 复杂封闭空间有源消声压电陶瓷片位置的优化[J]. 电声技术, 2002, (199): 7-10.

WANG Xiaofeng, RAO Zhushi, GENG Houcai. Optimum placement of PZT patches for active noise control in an irregular enclosure [J]. Audio Engineering (S1002-8684), 2002, (199): 7-10.

[10] 饶柱石, 罗超, 耿厚才, 等. 复杂封闭空间有源消声系统的建模新方法[J]. 振动工程学报, 2003, **16**(4):415-419.

RAO Zhushi, LUO Chao, GENG Houcai, et al. New modeling method for active noise control within an irregular enclosure[J]. Journal of Vibration Engineering(S1004-4523), 2003, **16**(4): 415-419.

[11] Kimball W G. Piezoceramic actuated transducers for interior acoustic noise Control[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.

[12] Hirsch S M, Meyer N E, Westervelt M A, KING P. Experimental study of smart segmented trim panels for aircraft interior noise control[J]. J. Sound Vib. (S0022-460X), 2000, **231**(4): 1023-1037.

[13] Fuller C R. Active control of sound transmission/radiation from elastic plates by vibration inputs:analysis[J]. J. Sound Vib. (S0022-460X), 1990, **136**: 1-15.

[14] Fuller C R. Active control of sound transmission/radiation from elastic plates by vibration inputs:experiments[J]. J. Sound Vib. (S0022-460X), 1992, **153**: 387-402.

- [15] Clark R L, Fuller C R. Control of sound radiation with adaptive structures[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*(S1045-389X), 1991, **3**(2): 431-452.
- [16] Frampton X D, Clark R L. Control of sound transmission through a convected fluid loaded plate with piezoelectric sensor/actuators[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structure*(S1045-389X), 1997, **8**: 686-696.
- [17] Gardonio P, Bianchi E, Elliott S J. Smart panel with multiple decentralized units for the control of sound transmission. Part I: Theoretical predictions[J]. *J. Sound Vib.* (S0022-460X), 2004, **274**: 163-192.
- [18] Gardonio P, Bianchi E, Elliott S J. Smart panel with multiple decentralized units for the control of sound transmission, part II: Design of the decentralized control units[J]. *J. Sound Vib.* (S0022-460X), 2004, **274**: 193-213.
- [19] Gardonio P, Bianchi E, Elliott S J. Smart panel with multiple decentralized units for the control of sound transmission. Part III: Control system implementation[J]. *J. Sound Vib.* (S0022-460X), 2004, **274**: 215-232.
- [20] Nguyen C H, Pietrzko S J. Piezoelectric mechanical acoustic couplings from a PZT-actuated vibrating beam and its sound radiation [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*(S0888-3270), 2004, **18**: 929-945.
- [21] BAO X Q, Varadan V K, Varadan V V, et al. Model of a bilaminar actuator for active acoustic control systems[C]. *J. Acoust. Soc. Am.* (S0001-4966), 1990, **87**(3):1350-1352.
- [22] Howarth T R, Varadan V K, Varadan V V. Piezoelectric coating for active underwater sound reduction[C]. *J. Acoust. Soc. Am.* (S0001-4966), 1992, **91**(2): 823-831.
- [23] Kim J, Varadan V V, Varadan V K. Finite element modeling of a finite piezoelectric sensor/actuator embedded in a fluid-loaded plate[A]. *Proc. Mathematics and Control in Smart Structures*[C]. Orlando FL, 1994. 273-280.
- [24] Zhao Hanzhong. Laminated piezoelectric plate for active underwater acoustic control[J]. *Acta Mechanica Sinica*(S0894-9166), 2001, **14**(4): 306-311.
- [25] Zhao Hanzhong. Acoustic reflection from a baffled elastic/piezoelectric plate[J]. *Acta Mechanica Sinica*(S0894-9166), 2002, **15**(2): 156-162.
- [26] Scandrett C. Scattering and active acoustic control from a submerged sphere shell[C]. *J. Acoust. Soc. Am.* (S0001-4966), 2002, **111**(2): 893-906.
- [27] 杨昆, 赵汉中, 袁丽芸. 水下压电/弹性材料复合层球壳声波反射的数值研究[J]. *噪声与振动控制*, 2004, (3): 12-14
YANG Kun, ZHAO Hanzhong, YUAN Liyun. A numerical study on the acoustic reflections from a submerged piezoelectric/elastic bilaminar sphere shell[J]. *Noise and Vibration Control*(S1006-1355), 2004, (3): 12-14.
- [28] LI S, ZHAO D Y. Numerical simulation of active control of structural vibration and acoustic radiation of a fluid-loaded laminated plate[J]. *J Sound Vib.* (S0022-460X), 2004, **272**: 109-124
- [29] 刘天雄, 石银明, 华宏星, 等. 主动约束层阻尼振动控制技术现状及展望[J]. *振动与冲击*, 2001, **20**: 1-10.
- LIU Tianxiong, SHI Yinming, HUA Hongxing, et al. Review on vibration control technology of active constrained layer damping[J]. *Journal of Vibration and Shock*(S1000-3835), 2001, **20**: 1-10.
- [30] 杜华军, 邓年春, 邹振祝, 等. 采用压电和黏弹性材料的杂交阻尼控制的研究[J]. *力学进展*, 2004, **34**(1):32-40.
DU Huajun, DENG Niancun, ZOU Zhengzhu, et al. Advances in hybrid damping structures using Piezoelectric and viscoelastic and materials[J]. *Advances in Mechanics* (S1000-0992), 2004, **34**(1):32-40.
- [31] Carneal J P. Re-active passive devices for control of noise transmission through a panel[DB/OL]. 2007.7. *Journal of Sound and Vibration*, Available Online at www.sciencedirect.com.
- [32] Guigou C, Fuller C R. Control of aircraft interior broadband noise with foam-pvdf skin[J]. *J. Sound Vib.* (S0022-460X), 1999, **220**(3): 541-557.
- [33] Wael N A. Smart foam for active vibration and noise control[D]. University of Maryland, 2004.
- [34] John Patrick D'Angelo. Attenuation of turbulent boundary layer induced interior noise using integrated smart foam elements[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.
- [35] Forward R L. Electronic damping of vibration in optical structures[J]. *Applied Optics*(S0003-6935), 1979, **18**: 690-697.
- [36] Hagood N W, von Flotow A. Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks[J]. *J. Sound Vib.* (S0022-460X), 1991, **146**: 243-268.
- [37] 王建军, 李其汉. 具有分支电路的可控压电阻尼减振技术[J]. *力学进展*, 2003, **33**(3):389-403.
WANG Jianjun, LI Qihan. Recent advances of vibration damping and control using piezoelectric materials with shunted circuits[J]. *Advances in Mechanics*(S1000-0992), 2003, **33**(3): 389-403.
- [38] 王建军, 姚建尧, 李其汉. 分支电路压电阻尼系统频域分析方法[J]. *振动工程学报*, 2004, **17**(2): 233-237.
WANG Jianjun, YAO Jianyao, LI Qihan. A general frequency response methods for piezoelectric shunt vibration damping [J]. *Journal of Vibration Engineering* (S1004-4523), 2004, **17**(2): 233-237.
- [39] 王建军, 姚建尧, 李其汉. 分支电路压电阻尼系统的分析模型和基本特性[J]. *工程力学*, 2005, **22**(6): 218-223.
WANG Jianjun, YAO Jianyao, LI Qihan. Modeling and characteristics piezoelectric shunt vibration damping [J]. *Engineering Mechanics*(S1000-4750), 2005, **22**(6): 218-223.
- [40] 杨智春, 孙浩, 崔海涛. 压电分流阻尼控制悬臂梁振动的参数优化分析[J]. *机械科学与技术*, 2005, **24**(6): 730-733.
YANG Zhicun, SUN Hao, CUI Haitao. Parameter optimization for vibration control of a cantilever beam using piezoelectric shunt damping system[J]. *Mechanical Science and Technology*(S1003-8728), 2005, **24**(6): 730-733.

- [41] 杨智春, 崔海涛, 孙浩. 压电分流阻尼控制悬臂梁振动的实验研究[J]. 机械科学与技术, 2005, **24**(5): 526-528.
YANG Zhicun, SUN Hao, CUI Haitao. Experimental study on vibration control of a cantilever beam by piezoelectric shunt damping system[J]. Mechanical Science and Technology(S1003-8728), 2005, **24**(5): 526-528.
- [42] 张付兴, 阎绍泽. 压电陶瓷片与多种电路机电耦合的阻尼特性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, **45**(8): 1040-1043.
ZHANG Fuxin, YAN Saoze. Damping characteristics of piezo-ceramics shunted by various types of electrical circuits[J]. J Tsinghua Univ(Sci & Tech) (S1000-0054), 2005, **45**(8): 1040-1043.
- [43] 耿济栋, 姚国兴. 压电陶瓷阻尼振动的有限元模型分析[J]. 振动、测试与诊断, 2006, **26**(3): 221-225.
GENG Jidong, YAO Guoxin. FEA model analysis of piezoceramics damping vibration[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis(S1004-6801), 2006, **26**(3): 221-225.
- [44] Kristina M J. An experimental evaluation of the application of smart Damping Materials for reducing structural noise and vibrations[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999.
- [45] Kim J, Choi J Y. Performance test for transmitted noise reduction of smart panels using piezoelectric shunt damping[J]. Smart Mater. Struct.(S0964-1726), 2005, **14**: 587-593.
- [46] WU S Y. Piezoelectric shunt vibration damping of F-15 panel under high acoustic excitation[A]. 7th International Symposium on Smart Structures and Mater[C]. Newport Beach, CA, 2000.
- [47] Guyomar D, Faiz A, Petit L, Richard C. Wave reflection and transmission reduction using a piezoelectric semi-passive nonlinear technique[J]. J. Acoust. Soc. Am. (S0001-4966), 2006, **119**: 285-298.
- [48] Faiz A, Guyomar D, Petit L, et al. Wave transmission reduction by a piezoelectric semi-passive technique[J]. Sensors and Actuators A(S0924-4247), 2006, **128**: 230-237.
- [49] Davis C L, Lesieutre G A. An actively tuned solid-state vibration absorber using capacitance shunting of piezoelectric stiffness[J]. J. Sound Vib. (S0022-460X), 2000, **232**(3): 601-617.
- [50] Kim J, Jung Y C. Broadband noise reduction of piezoelectric smart panel featuring negative capacitive converter shunt circuit[J]. J. Acoust. Soc. Am. (S0001-4966), 2006, **120**(4): 2017-2025.
- [51] Uchino K, Sumita M. Piezoelectric damping materials [P]. Japan: 03188165, 1991.8.
- [52] Sumita M. New damping materials composed of piezoelectric and electro-conductive, particle-filled polymer composites: effect of the electromechanical coupling factor [J]. Macromol. Chem. Rapid Commun. (S1022-1336), 1991, **12**: 657-662.
- [53] Thomas G B, Dyke V, Paul R, et al. Composite acoustic attenuation materials [P]. U. S: 7263028, 2007.8
- [54] Law H H. Mechanisms in damping of mechanical vibration by piezoelectric ceramic-polymer composite materials[J]. Mater. Sci.(S0022-2461), 1995, **30**: 2648-2655.
- [55] 蔡俊, 秦川丽, 徐菲, 等. 0-3型压电复合材料的声学性能研究[J]. 压电与声光, 2005, **27**(3): 294-296.
CAI Jun, QIN Cuanli, XU Fei, et al. Study on acoustic property of 0-3 piezoelectric composite[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics(S1004-2474), 2005, **27**(3): 294-296.
- [56] 蔡俊, 周保学, 蔡伟民. 导电相对压电复合材料吸声性能的影响[J]. 复合材料学报, 2006, **23**(3): 87-90.
CAI Jun, ZHOU Baoxue, CAI Weimin. Effect of electric conduction phase on acoustic absorption property of the piezoelectric composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica(S1000-3851), 2006, **23**(3): 87-90.
- [57] 成国祥, 沈锋, 卢涛, 等. 锆钛酸铅/高分子复合膜的吸声特性[J]. 高分子材料科学与工程, 1999, **15**(3): 133-135.
CHENG Guoxiang, SHEN Feng, LU Tao, et al. Acoustic absorption performance of lead zirconate titanate (PZT)/polymer composite films[J]. Polymer Materials Science and Engineering(S1000-7555), 1999, **15**(3): 133-135.
- [58] 贺江平, 钟发春. 基于压电效应的减振技术和阻尼材料[J]. 振动与冲击, 2005, **24**(4): 9-13.
HE Jiangping, ZHONG Facun. Vibration isolation technology and damping materials based on piezoelectric effect [J]. Journal of Vibration and Shock(S1000-3835), 2005, **24**(4): 9-13
- [59] 贺江平, 钟发春, 罗世凯. 以聚苯胺为导电通道的压电陶瓷/聚合物阻尼复合材料[A]. 2005年全国高分子学术论文集[C]. 北京, 2005.
HE Jiangping, ZHONG Facun, LUO Shikai. PZT/polymer damping materials having PANI conducting channels[A]. 2005 National Polymer Academic Report[C]. Beijing, 2005.
- [60] 温维佳, 沈平. 局域共振的光子、声子功能材料[J]. 物理, 2004, (2): 106-110.
WEN Weijia, SHENG Ping. Local resonance induced wave functional materials[J]. Physics(S0379-4148), 2004, (2): 106-110.