

主动约束层阻尼振动控制研究进展*

杜海平 石银明 张亮 史习智

上海交通大学振动、冲击、噪声国家重点实验室, 上海 200030

摘要 主动约束层阻尼 (Active Constrained Layer Damping, ACLD) 是以可控的压电材料代替被动约束层中不可控的约束层, 通过可控的约束层主动地控制黏弹性材料的剪切变形以进一步增大其对振动能量耗散的主动阻尼形式, 它充分结合了主动控制与被动阻尼作用各自的优势, 使得其在结构振动控制方面显示出极好的应用价值. 本文首先解释了 ACLD 的基本结构和阻尼机理, 然后综述了最近几年有关 ACLD 在结构建模, 控制方案及结构优化等方面的最新研究进展, 最后指出了应用前景并总结了进一步研究的问题.

关键词 主动约束层阻尼, 振动控制

1 引言

在航空、航天、机械、土木以及环境等许多工程领域都普遍存在着结构振动的问题, 防振、减振以及对振动进行主动控制一直是工程技术人员研究的重点问题.

对结构进行阻尼处理是工程上用来控制结构振动的一种有效方法. 最简单的阻尼形式是在原基体结构表面粘贴黏弹性材料或喷涂一层大阻尼的材料而构成自由阻尼层. 当结构发生振动时, 阻尼层因发生应变而将振动的能量转化为应变能并以热的形式进行耗散, 从而起到抑制振动的作用. 如果在自由阻尼层表面上再粘贴一层约束层则构成约束阻尼层. 由于约束层大大限制了自由阻尼层的拉伸变形从而进一步增大其剪切变形, 因此能更多地消耗结构振动的能量, 使抑制振动的作用更显著. 上述两种阻尼形式所提供的阻尼特性是固定的、被动的阻尼, 它不能随结构振动形式的变化而改变, 因而使其应用范围受到限制.

将压电片对称粘贴在结构的表面或嵌入结构内, 通过给压电片提供合适的电压使其产生应变从而抑制振动的方法是获得主动阻尼的最简单的形式. 这种方法能够满足阻尼特性随环境的变化而变化的要求, 并且附加质量轻、响应快, 具有一定的智能性. 但是, 主动阻尼控制振动也存在不足, 例如, 要实现大的阻尼则要求高的控制增益; 控制器的故障会使阻尼作用完全失效而造成结构失稳; 对高频控制需要付出更大的控制代价等.

被动阻尼与主动阻尼各有优势同时也存在局限性, 如何将两者进行互补, 实现既稳定可靠又智能高效的振动控制技术成为振动控制领域研究的方向之一. 主动约束层阻尼 (Active Constrained Layer Damping, ACLD) 正是迎合了这一需求而成为近期国内外研究的热点问题. ACLD 是以可控的压电材料代替被动约束层中不可控的约束层, 通过可控的约束层主动地控制黏弹性材料的剪切变形, 来进一步增大对振动能量的耗散. ACLD 能够保证即使在控制器发生故障时

收稿日期: 2000-03-29, 修回日期: 2000-09-11

* 国防科技重点实验室基金 (JS52.4.3) 资助项目

也能依靠阻尼层维持结构的稳定性. 同时, ACLD 通过阻尼层能够容易地实现对高频振动的抑制, 而通过主动约束层又能控制低频的振动, 使其在很宽的频率范围内都保持了较高的阻尼特性. ACLD 还能够降低控制能耗, 减轻附加质量, 因而应用领域更为广泛.

ACLD 结构振动控制是 80 年代末, 90 年代初提出的一种新型阻尼技术和混合控制方案^[1], 无论在国外还是国内, 研究工作都是刚刚起步^[2~4]. 本文首先解释了 ACLD 的基本结构和阻尼机理; 然后, 综述了最近几年有关 ACLD 在结构建模、控制方案及结构优化等方面的最新研究进展; 最后给出了应用前景及进一步研究的问题.

2 ACLD 的基本结构和阻尼机理

ACLD 一般由能用有效的主动控制方法控制其应变的压电约束层和被动的黏弹性自由阻尼层构成, 如图 1 所示.

ACLD 的阻尼机理如下^[5]: 当基体结构在轴向发生位移 u_0 后, 未施加控制的约束层轴向偏离 u , 黏弹性阻尼层发生剪切应变 γ_p , 如图 2(a) 所示. 在这种条件下, ACLD 起到通常的被动约束层阻尼 (PCLD) 的作用. 但是, 当约束层被控制器施加一定的控制电压后, 由压电效应产生附加轴向偏移 u_p 使黏弹性层的

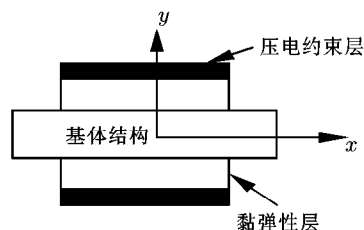


图 1 主动约束层阻尼结构图

剪切应变增加为 γ_a , 如图 2(b) 所示. 这种剪切应变的增加量 $\gamma_a - \gamma_p$ 进一步增强了 ACLD 的能量耗散特性并导致结构振动的有效阻尼增加. 同时, 压电层在控制器作用下, 所产生的收缩或扩展作用, 也会通过黏弹性层本身所具有的刚度, 直接传递到基体结构, 起到阻尼的作用. 只要约束层应变控制策略正确, 黏弹性阻尼层的剪切应变就会增加, 能量耗散特性就会增强, 从而使机体结构振动得到更有效的抑制.

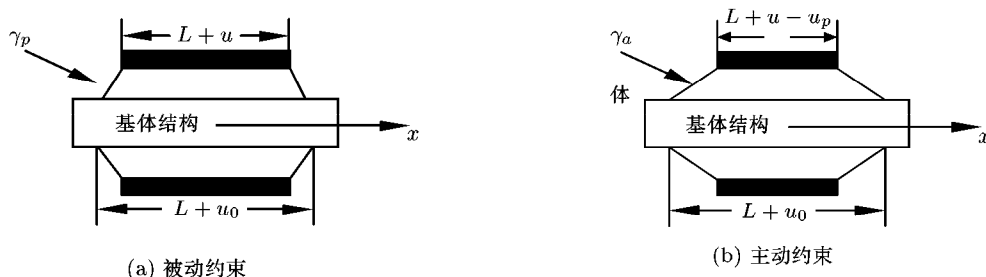


图 2 主动约束层阻尼工作机理

3 ACLD 结构建模

ACLD 结构的建模主要完成约束层、阻尼层、基体结构以及整体结构数学模型的建立. 由于黏弹性阻尼材料的力学本构关系受结构振动频率、振动幅度以及环境温度等因素影响大, 因此对其建立合理的模型是进行 ACLD 整体结构建模的关键. 本节主要给出黏弹性阻尼层和整体结构的建模研究结果.

3.1 黏弹性阻尼层模型

针对黏弹性阻尼层建模问题, 主要有以下几种方法.

3.1.1 复常数模量模型

该模型的应力应变关系为: $\sigma(t) = E^* \varepsilon(t)$, 其中, $E^* = (q_0 + iq_1)$ 是复常数. 这种模型形式

简单, 在简谐振动的情况下能很好地描述黏弹性材料的力学特性. Rongong 等^[6]采用复常数模量模型对受简谐激励时悬臂梁的轴向和横向振动抑制进行了研究. Baz^[5]用复常数模量模型对 ACLD 结构的能量耗散特性进行了研究. Shen^[7]采用复数模量 $E^* = 0.2(1 + 0.2i)$ 对梁结构进行了研究. Baz 和 Ro^[8]在 1996 年采用复常数模量模型对 ACLD 悬臂板结构进行了分析.

3.1.2 随频率变化的复变模量模型

Crandall^[9]将 E^* 定义为振动频率 ω 的函数, 提出了随频率变化的复变模量模型. 由于这种模型在频域能正确反映黏弹性材料的力学特性, 因此应用比较广泛. Varadan 等^[10]在 1996 年采用了这种模型, 其中, $E^*(\omega) = 0.142(\omega/2\pi)0.494(1 + 1.46i)$. 这一模型也曾被 Shen^[11], Huang 等^[12]采用过.

3.1.3 模态应变能模型

模态应变能模型由 Ungar 和 Kerwin^[13]在 1962 年首次提出, 1982 年 Johnson 和 Kienholz^[14]将其应用于夹层结构的黏弹性阻尼问题. 模态应变能是一种近似方法, 认为阻尼系统可由相应无阻尼系统的实正交模态表示. 这种方法的优点在于它能够用实特征值代替复特征值计算模态阻尼, 因而可以大大减少计算量. 文献 [14, 15] 分别提出了改进方法. Duane 等^[16]采用模态应变能方法对悬臂梁的主动阻尼, 被动约束层阻尼, 主动约束层阻尼进行了对比研究.

3.1.4 GHM 模型

为了能够精确描述黏弹性材料的力学性能, 而且与有限元方法完全相容, 使系统能够表示为线性二阶系统, Golla 和 Hughes^[17]提出的方法经 McTavish^[18]改进形成了对黏弹性材料的处理模型即 GHM 模型.

GHM 模型的优点是能与有限元方法相容, 可导出具有辅助耗散自由度的二阶定常线性系统, 能很方便地进行模态响应计算和主动控制. 很多文献中都用到 GHM 模型, 如文献 [19~21] 等.

3.1.5 其它模型

除以上几种模型外, 还有分数导数模型^[22], ADF (Anelastic Displacement Fields) 模型^[23]等.

3.2 ACLD 整体结构模型

对于 ACLD 整体结构的建模方法可归结为三种: 解析法, 数值法, 实验法.

3.2.1 解析法

对于结构简单, 形状规则的板、梁等结构, 可以根据其主动约束层, 黏弹性阻尼层以及基体结构本身的本构关系, 依照一定的原理 (如 Hamilton's principle) 或方法 (如 Mead and Markus's approach) 综合出整体结构的动力学微分方程并求出解析解. Rongong 等^[6]采用 Rayleigh-Ritz 法获得了梁的纵向和横向振动数学模型. 通过对这些模型进行开环及闭环数值仿真的结果表明, ACLD 在稳定性及性能方面较被动约束层阻尼和单纯的主动阻尼都有很大的改进. Shen^[7]导出了悬臂梁 ACLD 整体结构的八阶微分方程, 其中黏弹性材料的本构关系用复模量表示, 并讨论了这种结构的可控性, 可观性及稳定性. 结果表明, 控制作用是通过边界条件实现的, 不合适的边界条件会导致不可控或不可观性. Baz^[24]也导出了悬臂梁的微分方程, 提出了一种稳定的边界控制策略, 并找出稳定的控制增益. Baz^[25]还根据 Hamilton 原理建立了连续布置 ACLD 悬臂梁的分布参数模型.

3.2.2 数值法

在实际工程应用中, 大多数结构形状复杂, 解析方程很难得到, 因此要用数值法进行求解. 有限元法能将连续的无限自由度问题转化为离散的有限自由度问题, 是目前应用最为广泛的数

值方法之一。

有限元法在主动阻尼结构的建模研究中已取得了丰硕的成果^[26],而针对含有黏弹性材料的被动约束层阻尼结构的建模研究也获得了许多不同的方法和结论^[27]。如何有效地处理黏弹性材料的本构关系并将其与有限元法进行很好的结合是采用有限元法对 ACLD 结构进行建模的主要研究问题之一。

Liao^[21]用 GHM 模型处理黏弹性材料,对 ACLD 悬臂梁进行了有限元建模研究。Varadan^[10]采用复变模量表示黏弹性材料,将 Poisson 比视为常数 0.33 对 ACLD 悬臂铝板进行了三维有限元建模。通过对不同的材料采用不同的三维元素进行刻画,更准确地构造了系统的理论模型。Duane^[16]采用模态应变能模型处理黏弹性材料,对 ACLD 梁和板进行了有限元建模。Lesieutre^[23]采用 ADF 模型处理黏弹性材料,对 ACLD 悬臂梁有限元建模,并讨论了 ACLD 结构非连续布置的情形,结果表明,非连续布置的 ACLD 鲁棒性更好。Friswell^[28]采用 GHM 模型处理黏弹性材料,用有限元法对 ACLD 悬臂梁进行分析,并讨论了自由度缩减、模型简化等问题。Nostrand 等^[29]对 Euler-Bernoulli 梁的瞬态弯曲振动也进行了有限元建模和分析。

3.2.3 实验法

在对 ACLD 结构进行建模研究的过程中,实验法主要用于验证已建立的解析模型和有限元模型,上述许多文献中,理论模型的建立大都用实验法进行了有效的验证。在将 ACLD 结构应用于振动控制以及进行控制理论研究和结构优化设计的过程中,实验则是一项必不可少的研究手段,同时也是必要的过程,因此,实验在 ACLD 结构振动控制问题的研究中具有非常重要的作用。

Baz 等^[8]通过实验对 ACLD 进行了研究,验证了其有限元理论模型并对控制效果进行了比较研究。Grassidis 等^[30]针对 ACLD 建立了一套实验装置,根据实验获得的随机输入及响应信号,采用 ERA (eigensystem realization algorithm) 算法识别出系统的状态空间模型,与用有限元法获得的理论模型进行了比较,验证了理论模型的正确性。同时,进行了在不同环境温度下以及含有参数不确定性情况下的振动控制实验,与主动阻尼及被动约束阻尼进行了对比研究。Yellin 等^[31]提出了一种自感应式 ACLD 结构并用实验进行了建模和控制方面的研究。Liao^[32~34]等则提出了一种增强边界作用的新式 ACLD 结构,通过实验结果证明,这种结构比原来的 ACLD 结构更具鲁棒性,同时用实验进行了结构优化设计方面的研究。Poh 等^[35]进行了一个更为实际的应用 ACLD 进行声波辐射控制的实验,结果表明,ACLD 能有效抑制结构振动,从而很好地起到控制声源的作用。

4 ACLD 结构振动控制策略

由于 ACLD 结构上有可控的约束层,因此如何给约束层提供合适的控制信号以及提供什么样的信号就是 ACLD 结构振动控制所要研究的控制策略问题。如果不提供控制信号,则 ACLD 就相当于一般的约束层阻尼,而如果提供的控制信号不合适则有可能造成系统的不稳定或控制器不能实现。因此,控制策略的研究是进行 ACLD 结构振动控制的重要研究内容之一。进行 ACLD 研究的初期,主要内容集中于模型的建立问题,控制策略的研究则很少,一般是采用简单的直接速度或横向位移反馈的比例或比例/微分(PD)控制器^[28]实现控制的目的。其中,控制增益的选择则是基于 Shen^[7]或 Baz^[36]所提出的稳定边界条件或最优控制策略用试凑的方法得到。最近,出现了多篇以控制策略为主题的有关 ACLD 的研究,所提出的控制策略主要有以下几种:

4.1 边界控制 (Boundary Control)

Baz^[24]针对 ACLD 的工作特性,根据分布参数控制理论设计了边界控制方案。这种方案能够通过边界的控制作用保证 ACLD 结构的所有振动模态全局稳定,并且在很宽的频率范围内提供高的阻尼。Baz 还将这一工作分别用在梁^[37]和壳^[38]的控制上。

4.2 鲁棒控制

Baz 和 Poh^[39] 针对由地震引发的具有动态参数不确定性的结构振动问题, 采用 ACLD 并设计了滑动模块鲁棒控制器. 这种控制方法在很宽的参数不确定性范围内都表现出较好的作用效果. 由于在 ACLD 中, 黏弹性阻尼材料的特性受温度和频率的变化影响较大, 因此针对这种参数不确定性以及有限元建模时由模型截断等引起的建模不确定性和外部扰动等设计鲁棒控制器是非常必要的. Baz^[25] 应用鲁棒控制理论, 针对 ACLD 结构设计了 H_2 控制器. 数值仿真结果表明, 当 ACLD 结构的参数随温度和频率的变化发生很大的变化时, 这种控制器依然能有效地抑制振动. H_2 控制器在出现参数不确定性和外部扰动时, 其稳定控制边界仍然有限, 因此 Grassidis^[30] 又进一步设计了 H_∞ 控制器, 实现了最优的扰动抑制效果. 通过在不同的温度和工作频率下与常规 PD 控制器以及被动约束层阻尼进行实验对比, 进一步验证了 ACLD 在结构振动控制方面的高效性.

4.3 最优控制

Baz 和 Ro^[36] 针对 ACLD 结构提出了最优设计与控制方案. 首先采用传统的优化方法, 以使模态阻尼比最大、重量最轻为准则, 进行黏弹性阻尼层的厚度和剪切模量优化设计. 然后, 以使振动和控制的能量最小为目标, 进行控制增益的优化设计, 形成了最优控制策略. Lam 等^[40] 研究了根据 ACLD 的长度和位置进行优化控制的问题, 设计了 LQR 最优控制器. Liao 等^[41] 则应用 LQR 最优控制策略深入研究了 ACLD 结构的配置对控制力的需求以及对振动抑制效果的响应等方面的问题.

4.4 自适应控制

为抑制面板振动产生的声波向密闭空间的辐射, Poh 等^[35] 用 ACLD 控制面板的振动, 并采用自适应最小均方 (LMS) 算法设计了自适应 FX-LMS 控制器. 实验结果表明, 采用 ACLD 结构以及自适应控制算法能有效抑制声的辐射, 并且所需的控制电压仅为单纯的主动控制所需电压的三分之一.

5 ACLD 结构的优化设计

由于 ACLD 结构中, 黏弹性阻尼层以及约束层的厚度、大小以及在基体结构上的位置可以有许多不同的组合形式, 每一种组合都会产生不同的作用效果, 因此, 如何能以最轻的重量、最小的控制代价获得最优的振动能量耗散特性则是进行 ACLD 结构优化设计的主要目标. 目前, ACLD 结构的优化设计主要围绕着控制增益、ACLD 的厚度、长度以及在基体结构上的位置进行.

Baz^[5] 优化了开环和闭环 ACLD 结构的振动能量耗散特性, 提供了最优的 ACLD 长度和最优的控制增益, 这一工作被 Ray 和 Baz^[42] 用于板结构的振动控制中. 最近, Ro 和 Baz^[43] 提出了部分配置 ACLD 结构的参数最优设计策略. 这种方案基于最优设计理论和模态应变能方法, 用有限元模型确定 ACLD 板结构的模态应变能. 通过数值仿真证明, 这种优化设计不仅给出了黏弹性阻尼层最优的剪切模量, 而且给出了约束层的最优厚度和 ACLD 的最优位置. Velej 和 Rao^[44] 以 ACLD 中每一层的厚度、控制增益以及 ACLD 的位置作为设计变量, 采用有限元模型并结合一定的优化算法对最优位置、最优厚度、最优控制增益进行了计算以实现满足最低的 ACLD 重量要求.

6 应用前景及进一步研究的问题

结构振动的主动控制是近 20 年来研究的热点问题, 特别是压电陶瓷等智能材料的应用使得主动控制方案在航空、航天等许多工程领域得到了实际的应用. 由于 ACLD 具有良好的能量耗

散特性, 使得其在结构振动控制方面具有广泛的应用前景. 目前, 国内外已对 ACLD 在杆、管、梁、板、壳、环等基本结构振动控制方面的应用作了详细的理论和实验研究. 更接近实际的应用则是将 ACLD 用于直升机悬翼的振动抑制^[45] 以及用于飞机一部分机身的振动和内部噪声抑制^[46], 还有将 ACLD 用于飞机着陆部件的振动控制^[47] 等. ACLD 还被用于抑制由内部流体引起的管壁的振动^[48]. 将 ACLD 用于声波辐射的控制也取得了非常好的结果^[35,49].

总结已经取得的有关研究成果, 可以看出, ACLD 的研究和应用还只是一个开端, 有许多问题还有待进一步的研究探讨, 主要有以下几个方面:

(1) 在 ACLD 结构中, 黏弹性材料的本构关系受振动频率、幅值和环境温度影响较大, 因此寻求合理描述黏弹性材料本构关系的方法依然需要研究.

(2) 描述 ACLD 结构模型的三种方法还需要进一步的探讨. 有限元法需要完善, 数值法和实验法则需要进一步应用到实际的复杂结构中.

(3) ACLD 结构的控制策略研究较其建模方面的研究还显不足. 由于 ACLD 中黏弹性阻尼层受环境影响大, 因此有必要发展和研究更合适的控制策略特别是鲁棒控制, 自适应控制, 智能控制(神经网络, 模糊逻辑等) 等以克服和解决模型建立的不确定性和参数变化.

(4) 对 ACLD 结构的优化设计问题是一个多参数多目标的优化问题, 需要进一步结合先进的优化方法如遗传算法, 模拟退火算法等进行研究.

7 结束语

大量的研究结果已经证明: ACLD 用于结构振动的控制是可行的, 而且比被动约束层阻尼和单纯的主动阻尼具有更高的能量耗散特性, 适应更宽的频率和温度变化范围. ACLD 的研究在结构建模、结构和控制的优化设计等方面还在不断地深入进行, 并且逐渐地被应用到实际的工程之中. 比较国外的研究进展情况, 我国还需加强这方面的研究.

参 考 文 献

- 1 Baz A, Ro J, et al. The concept and performance of active constrained layer damping treatment. *J Sound and Vibration*, 1994, 28(3): 18~21
- 2 唐永杰, 宴砺堂等. 结构振动控制中压电阻尼技术研究: (三) 机敏约束层阻尼技术. *压电与声光*, 1996, 18(4): 92~95
- 3 张希农等. 可控约束层阻尼板的杂交控制. *应用力学学报*, 1999, 16(3): 15~21
- 4 张希农等. 具有主动约束层阻尼板的振动杂交控制. *应用数学和力学*, 1998, 19(12): 1035~1048
- 5 Baz A. Optimization of energy dissipation characteristics of active constrained layer damping. *Smart Materials and Structures*, 1997, 6: 360~368
- 6 Rongong J A, et al. Modeling of a hybrid constrained layer/piezoceramic approach to active damping. *J Vibration and Acoustics*, 1997, 119: 120~130
- 7 Shen I Y. Hybrid damping through intelligent constrained layer treatments. *J Vibration and Acoustics*, 1994, 116: 341~349
- 8 Baz A, Ro J. Vibration control of plate with active constrained layer damping. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5: 272~280
- 9 Crandall S H. The role of damping in vibration theory. *J Sound and Vibration*, 1970, 11(1): 3~18
- 10 Varadan V V, et al. Closed loop finite modeling of active/passive in structural vibration control. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5: 685~694
- 11 Shen I Y. A variation formulation, a work-energy relation and damping mechanisms of active constrained layer treatments. *J Vibration and Acoustics*, 1997, 119: 192~199
- 12 Huang S C, et al. Some design consideration for active and passive constrained layer damping treatments. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5: 301~313
- 13 Ungar E E, Kerwin E M. Loss factors of viscoelastic systems in terms of energy concepts. *J Acoustical Society of America*, 1962, 34: 954~957
- 14 Johnson C D, Kienholz D A. Finite element prediction of damping in structure with constrained viscoelastic layers. *AIAA J*, 1982, 20(9): 1284~1290

- 15 Hu B G. A modified MSE method for viscoelastic systems: a weighted stiffness matrix approach. *J Vibration and Acoustics*, 1995, 117(1): 226~231
- 16 Duane E V, Rao S S. A comparison of active, passive and hybrid damping in structural design. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5: 660~671
- 17 Golla D F, Hughes P C. Dynamics of viscoelastic structures——A time-domain finite element formulation. *J Applied Mechanics*, 1985, 52: 897~907
- 18 McTavish D J, Hughes P C. Modeling of linear viscoelastic space structures. *J Vibration and Acoustics*, 1993, 115: 103~110
- 19 Mctavish D J, et al. Prediction and measurement of modal damping factors for viscoelastic space structures. *AIAA J*, 1992, 30(5): 1392~1399
- 20 Margaretha J L, et al. Vibration control through passive constrained layer damping and active control. *J Intelligent Materials Systems and Structures*, 1997, 8: 663~677
- 21 Liao W H, Wang K W. On the active-passive hybrid control actions of structures with active constrained layer treatments. *J Vibration and Acoustics*, 1997, 119: 563~572
- 22 陈前, 朱德懋. 关于复合结构振动分析中黏弹性材料本构方程的形式. *应用力学学报*, 1987, 4(1): 39~51
- 23 Lesieutre G A, et al. A finite element for beams having segmented active constrained layers with frequency-dependent viscoelastics. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5: 615~627
- 24 Baz A. Boundary control of beams using active constrained layer damping. *J Vibration and Acoustic*, 1997, 119: 166~172
- 25 Baz A. Robust control of active constrained layer damping. *J Sound and Vibration*, 1998, 211: 467~480
- 26 Kim J, et al. Finite element modeling of a smart cantilever plate and comparison with experiments. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5: 165~170
- 27 Austin E M. Variations on modeling of constrained-layer damping treatments. *The Shock and Vibration Digest*, 1999, 31: 275~280
- 28 Friswell M I, Inman D J. Finite element models with viscoelastic damping. In: Proceeding of IMAC XVII, 1998. 181~187
- 29 Nostrand Van W C, et al. Finite element models for active constrained layer damping. In: North American Conference on Smart Structures and Materials, Orlando, Fl, 1994. 126~137
- 30 Grassidis J L, Baz A, Wereley N. Hinfinitiy control of active constrained damping. *Journal of Vibration and Control*, 2000, 6: 113~136
- 31 Yellin J M, Shen I Y. A self-sensing active constrained layer damping treatment for a Euler-Bernoulli beam. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5: 628~637
- 32 Liao W H, Wang K W. A new active constrained layer configuration with enhanced boundary actions. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5: 638~648
- 33 Liao W H, Wang K W. Characteristics of enhanced active constrained layer damping treatments with edge elements, Part 1: Finite element model development and validation. *J. Vibration and Acoustics*, 1998, 120: 886~893
- 34 Liao W H, Wang K W. Characteristics of enhanced active constrained layer damping treatments with edge elements, Part 2: System analysis. *J Vibration and Acoustics*, 1998, 120: 886~893
- 35 Poh S, Baz A. Experimental adaptive control of sound radiation from a panel into an acoustic cavity using active constrained layer damping. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5: 649~659
- 36 Baz A, Ro J. Optimum design and control of active constrained layer damping. *J Mechanical Design*, 1995, 117: 135~144
- 37 Baz A. Dynamic boundary control of beams with active constrained layer damping. *J Mechanical Systems & Signal Processing*, 1997, 11: 811~825
- 38 Baz A, Chen T. Boundary control of axis-symmetric vibrations of cylindrical shells using active constrained layer damping. In: 35th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit. AIAA-97-0360, 1997
- 39 Baz A, Poh S. Active constrained layer damping of seismic excitation. *Design Engineering Technical Conference, ASME*, 1995, 3: 691~699
- 40 Lam M J, Inman D J, Saunders W R. Vibration control through passive constrained layer damping and active control. *J Intelligent Material, Systems and Structures*, 1996, 8: 663~677
- 41 Liao W H, Wang K W. Analysis and design of viscoelastic materials for active constrained layer treatments. In: Proceedings of the Conference on Smart Structures and Materials: Passive Damping, 1996. 212~223
- 42 Ray M, Baz A. Optimization of energy dissipation of active constrained layer damping treatments of plates. *J Sound and Vibration*, 1997, 208: 391~406

- 43 Ro J, Baz A. Optimum placement and control of active constrained layer damping. In: Proceedings of the SPIE, 1998. 844~855
- 44 Veley D E, Rao S S. Optical design of structures with active constrained layer damping. In: SPIE Smart Structures and Materials, 1995. 98~109
- 45 Badre-Alam A, Wang K W, Gandhi F. Optimization of enhanced active constrained layer (EACL) treatment on helicopter flexbeams for aeromechanical stability augmentation. *Smart Materials and Structures*, 1999, 8: 182~196
- 46 Herdic P, Baz A, Houston B. Structural acoustics and active constrained layer damping of a full scale fuselage section: an experimental approach. ASME, NCA-25, 1997. 43~54
- 47 Kwak S K, Washington G, Yedaralli R. Active and passive vibration control of landing gear components. ASME, AD-59, 1999. 269~275
- 48 Ro J, et al. Vibration control of tubes with internally moving loads using active constrained layer damping. ASME, DE-95, 1997. 1~11
- 49 Ro J, Baz A. Control of sound radiation from a plate into an acoustic cavity using active constrained layer damping. *Smart Materials and Structures*, 1999, 8: 292~300

RESEARCH PROGRESSES ON VIBRATION CONTROL OF ACTIVE CONSTRAINED LAYER DAMPING*

Du Haiping Shi Yinming Zhang Liang Shi Xizhi

The State Key Laboratory of Vibration, Shock & Noise, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China

Abstract Active constrained layer damping (ACLD) is an active damping form that replaces the uncontrolled constrained layer of passive constrained layer by controlled piezoelectric materials and actively controls the shear deformation of viscoelastic materials by controlled constrained layer in order to enhance the energy dissipation of vibration. It sufficiently combines the advantages of active control and passive damping and reveals excellent application values on structure vibration control. This paper explains the structure and the operating mechanism of ACLD at first. And then, reviews the recent researching progresses on structure modeling, control strategy and structure optimization of ACLD etc. At last, indicates the future application and summarizes the further studying problems.

Keywords active constrained layer damping, vibration control

* The project supported by the National Defence Science and Technology Key Laboratory Foundation (JS52.4.3).