

基于遗传算法的约束阻尼梁减振优化分析

赵冬艳^{*,1)} 石慧荣[†]

^{*}(甘肃民族师范学院物理与水电工程系, 甘肃合作 747000)

[†](兰州交通大学机电工程学院, 兰州 730070)

摘要 约束阻尼结构能有效减振, 但会增加结构的质量和体积, 基于此有必要对其结构进行优化. 本文应用有限元软件 ANSYS 建立增设支撑层的约束阻尼梁模型, 根据模态应变能原理提取约束阻尼梁的模态损耗因子, 并建立以阻尼段长度、约束层厚度、支撑层厚度、阻尼段数目为设计变量的目标函数, 利用 MATLAB 多目标遗传算法进行优化运算. 计算结果表明, 优化后的约束阻尼结构能够在引入质量较小情况下有效减小梁振动幅度, 使振动在较短的时间内衰减.

关键词 遗传算法, 有限元, 约束阻尼, 优化, 损耗因子

中图分类号: TB533.1, V214.3+3 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2011)04-013-04

REDUCTION OF VIBRATION AND OPTIMIZATION OF BEAMS WITH CONSTRAINED LAYER DAMPING PATCH BASED ON GENETIC ALGORITHM

ZHAO Dongyan^{*,1)} SHI Huirong²⁾

^{*}(Department of Physics & Hydroelectric Engineering, Gansu Normal University For Nationalities, Gansu Hezuo 747000, China)

[†](School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract Though the constrained layer damping can reduce the vibration effectively, it increases the weight and the size of the structure. Thereby an optimization of the constrained layer damping treatment is necessary. In this paper, a new model of the partial stand-off constrained layer damping patch is established in the finite element software ANSYS. Based on modal strain energy principles, the modal loss factor of the proposed model can be found. An objective function related to the modal loss factors is constructed. Its design variables include the number, the length and the spacing between of damping patches, the thickness of the stand-off layer and the constrained layer. By using the multi-objective genetic algorithm of MATLAB, the optimization is carried out. The results of examples show that after the optimization the constrained layer damping can reduce vibration more effectively with less additional weight and attenuate the vibration of the structure in a shorter period of time than before the optimization.

Key words genetic algorithm, finite element, constrained layered damping, optimization, loss factor

振动与噪声普遍存在于人们的生产和生活之中, 振动的危害几乎涉及国民经济生产的各个领域, 如航空航天中的飞行器与太空结构、航海中的船舶、土木界的桥梁与房屋、机械行业的机床与刀具、各种交通工具以及动力机械等, 都在以特有的形态进

行着振动. 很多机器设备由于振动造成了破坏或者报废, 给国民生产带来了巨大的经济损失, 因此改善、控制和利用振动对国防建设、航空航天技术研究以及工业技术的进一步发展都具有重大的意义^[1-2]. 约束阻尼具有良好的减振效果, 自从 Swallow^[3]

2010-10-29 收到第 1 稿, 2011-01-03 收到修改稿.

1) 赵冬艳, 女, 讲师, 甘肃民族师范学院物理与水电工程系, 主要研究应用力学. E-mail: shrz98@sohu.com

提出约束阻尼减振的概念以来,大量的文献对约束阻尼进行研究, Cai 和 Zheng 等^[4]在局部敷设约束阻尼梁进行了深入研究,近年来很多研究者对约束阻尼的减振效果进行了优化分析, Baz 和 Ro^[5]用单步搜索法对主动约束阻尼的单个模态系统阻尼进行了优化,设计变量为黏弹性层的厚度和剪切模量; Chen 和 Hunag^[6]用拓扑法对损耗因子进行优化,设计变量是阻尼层的敷设位置,这些优化虽然能够在一定程度节约材料,减小梁的振动幅度,但是考虑影响因素较少,有时甚至可能达到局部收敛,所以一直以来没有一种完备的优化方式. 本文为了增加黏弹性层的变形,对传统的约束阻尼结构增加支撑层,同时保持约束层为连续体,采用多目标遗传算法,考虑多个变量的影响,能够得到更加可信的计算结果.

1 模型建立

传统的约束阻尼结构是在基层直接铺设阻尼层,而且基于欧拉-贝努力梁原理,黏弹性层的横向剪切变形都被忽略,本文采用铁木辛柯梁单元,在阻尼层和基层之间加设了一层支撑层,几何模型如图 1 所示,由于在弯曲振动时,支撑层和连续的约束层能够使阻尼层的形变增加,使阻尼层充分吸收振动能量,从而能够更加高效减小结构的振动.

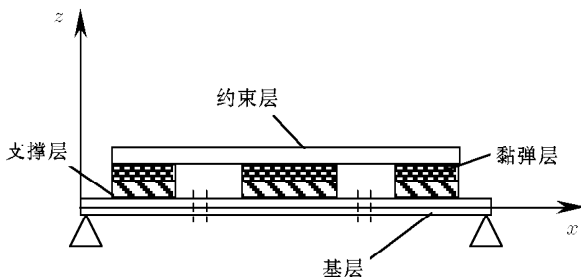


图 1 约束层连续的含支撑层阻尼梁结构

模型采用大型有限元软件 ANSYS 建立,假定层与层结合面处没有相对滑动,基层、约束层相对于支撑层和黏弹性层的损耗因子很小忽略不计,应用阻尼材料的 Maxwell 模型,采用复刚度法^[7],设定剪切模量 $G_v^* = G_v(1 + j\eta_v)$,对振动约束阻尼梁系统进行分析.

基于模态应变能的有限元法在研究复合结构阻尼中被证明是一种非常有效的方法^[8-9],这个概念首先由 Ungar 和 Kerwin^[10]提出,其基本形式为

$$\eta_r = \sum_{j=1}^n \beta_j \frac{SE_j^r}{SE^r} \quad (1)$$

其中, η_r 是 r 阶模态的损耗因子, SE^r 为 r 阶模态的总应变能, SE_j^r 为 r 阶模态的第 j 种黏弹性材料的应变能, β_j 为第 j 种黏弹性材料的损耗因子, n 为黏弹性材料的种类数.

约束阻尼结构主要是利用黏弹性材料的剪切变形来实现的,在有限元软件 ANSYS12.0 中把三维板梁结构简化为平面结构,在模型中板梁的厚度小于长度的 $1/10$,所以计算结果可以保证^[11],应用二维 8 节点单元 plane 183 对结构进行网格化,其微元结构如图 2 所示.通过对结构进行模态分析后,提取各阶模态下不同材料的应变能 SE ,由式 (1) 求的模态损耗因子,损耗因子 η_r 越大则黏弹性材料吸收的能量越多,减振效果越好.

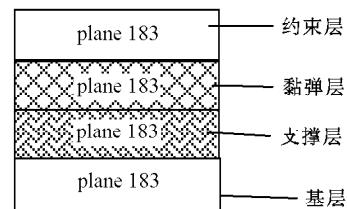


图 2 微元结构

2 优化函数设计

对于整个结构的减振不能引入太大的质量,同时梁的振动包含了多个模态,每一阶模态的固有频率不同,模态振型对系统的影响也不同,所以优化目标函数要包含各阶模态损耗因子,同时减振增加的阻尼结构会使系统质量增加,故而结构优化同时要限制引入质量.数值计算软件 MATLAB 具有强大数值分析能力,其多目标遗传算法能够实现各模态损耗因子的寻优设计,而对于 MATLAB 优化时一般只能求取目标的最小值,所以目标函数为

$$\mathbf{F} = \{f_i\} = \{-\eta_i/m_z\} \quad (2)$$

其中, m_z 为结构减震引入的总质量, \mathbf{F} 为目标函数, f_i 为第 i 个目标分量, η_i 是第 i 阶模态损耗因子, η_i 和 m_z 都是设计变量的函数.由式 (2) 知,引入质量越大目标函数也越大,损耗因子越大目标函数越小,这样既限制了引入质量,又能保证使损耗因子达到理想值.

设计变量分别为阻尼层长度 l_1 和 l_2 ,阻尼敷设段数 n ,阻尼段间间隙宽度 gp_1 和 gp_2 ,约束层厚度 h_c ,支撑层厚度 h_s .由于阻尼层的厚度变化对结构整体的损耗因子影响不大,所以将其定为常数.

3 优化方案

大型有限元软件 ANSYS 建模简单, 结构计算能力强大, 但由于 ANSYS 的优化算法二分法、线性规划、微分法容易局部收敛, 其优化设计受到限制, 而遗传算法 (genetic algorithm, GA) 是一种借鉴生物进化规律而形成的并行随机搜索最优化方法, 可通过选择、交叉和变异能得到全局最优解^[12], 有效避免了 ANSYS 优化中的不足. 利用 MATLAB 的多目标优化遗传算法程序包, 能够完成对函数的编码机制、适应度函数、遗传算子和控制参数的工作; 但是 MATLAB 中建立有限元模型困难, 所以本文应用 ANSYS 的 apdl 语言建立有限元模型, 通过 MATLAB 调用 ANSYS 程序求解目标函数, 将结果返回 MATLAB, 通过多目标遗传算法程序寻优, 直到得到最优解. 其基本过程:

(1) 给定设计变量初值;

(2) 由 MATLAB 调用 ANSYS 对阻尼梁进行有限元分析计算, 得到目标函数值;

(3) MATLAB 读取所得目标函数值, 执行遗传算法, 对个体进行配对、交叉、变异得到新的群组 (设计变量);

(4) 调用 ANSYS 对新的结构进行分析, 得到目标函数和优良度.

重复以上步骤 (2)~(4) 直到得到最优解, MATLAB 输出最佳种群.

4 算例分析

简支梁的几何参数长度 $L = 0.4\text{ m}$, 宽 $B = 0.03\text{ m}$, 厚度 $h_b = 4\text{ mm}$, 弹性模量 $E_b = 70\text{ GPa}$, 密度 $\rho_b = 7800\text{ kg/m}^3$. 黏阻尼材料的剪切模量为 $G_v = 0.896(1 + 1.46j)\text{ MPa}$, 厚度为 $h_v = 1\text{ mm}$, $\rho_v = 1000\text{ kg/m}^3$, 约束层材料参数 $E_c = 49\text{ GPa}$, $\rho_c = 7500\text{ kg/m}^3$, 在黏弹性层和基层之间加入支撑层, 其刚度 G_s 为 $3(1 + 0.04j)\text{ GPa}$, $\rho_s = 1190\text{ kg/m}^3$. 由于阻尼层布置是关于中点对称, 多目标优化遗传算法多次调用 ANSYS 进行分析计算, 计算量较大, 所以建模时在梁的终点处采用对称约束, 这样几何模型、单元数和节点数减少一半, 有效减少了计算量, 节约优化计算时间, 提高了优化效率和分析的可靠性.

对于简支梁中点的振幅变化最显著, 分析中选取中点为观察点, 而根据模态振型中点振幅只有在奇数模态时变化最显著, 在偶数模态的振幅波动较

小, 所以本文主要针对前五阶模态中奇数模态的中点振动特性进行比对, 优化计算主要奇数模态的损耗因子.

由表 1 可得优化结果的模态固有频率相对于光梁变化较小, 而全敷设结构变化较大, 第一阶模态全敷设减小 12.2 Hz , 优化解几乎没有变化; 第三和第五阶模态全敷设的频率分别降低 32.4% 和 35.8% , 优化解为 16.2% 和 17.9% ; 所以全敷设阻尼严重影响了板梁结构的刚度. 对于损耗因子在低阶模态 1 和 3 优化结构较大, 在高阶模态 5 全敷设较大, 但是两者相差不大.

表 1 模态固有频率和损耗因子

模态	光梁 ω/Hz	优化后 ω/Hz	优化后 η	全敷设 ω/Hz	全敷设 η
1	57.6	58.6	0.470 2	45.411	0.379 3
3	517.8	434.12	0.115 7	349.93	0.086 3
5	1434.5	1177.8	0.092 5	920.58	0.111 2

由图 3 可已看出, 增加约束阻尼的全敷设和优化结果能够有效减小振幅变化幅度, 优化后的阻尼结构在低频模态减振更加明显, 高频模态的减振效果和全敷设结构相差不多, 但全敷设引入质量为 115.6% , 而优化阻尼梁的引入质量仅仅为 32.7% , 有效减少了结构重量.

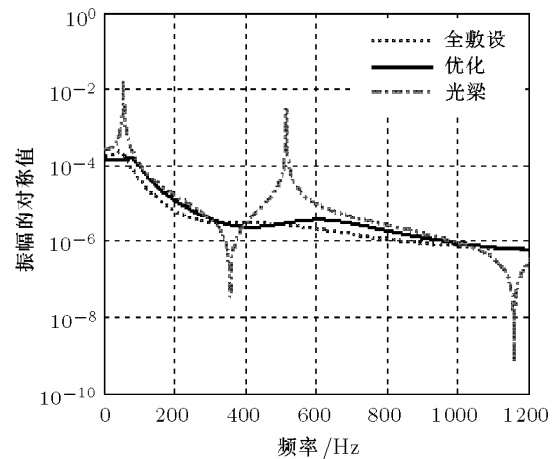


图 3 幅频特性曲线

图 4~图 6 分别是全敷设阻尼结构和优化阻尼结构在 1 s 内中点位移、速度和加速度的时域响应曲线, 可以看出, 在 0.2 s 内优化结构速度和加速度能够迅速衰减, 而全敷设结构需要 0.48 s 才能够稳定; 对于位移响应优化结构也只需 0.25 s , 全敷设结构则需要 0.53 s 后才能达到稳定.

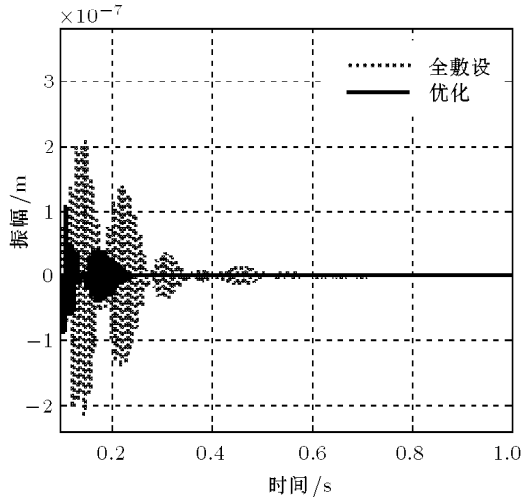


图4 时域振幅响应

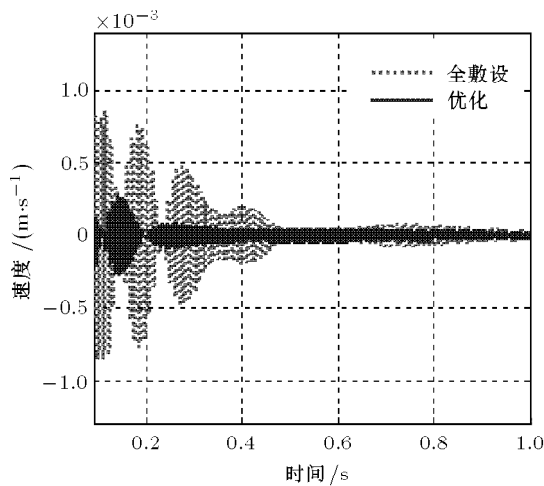


图5 时域速度响应

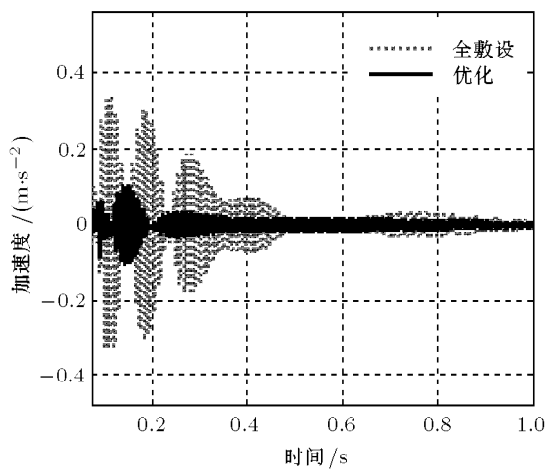


图6 时域加速度响应

5 结论

(1) 约束阻尼层减振效果受到多个因素的影响, 数值计算软件 MATLAB 和有限软件 ANSYS 的交互使用能够实现更加高效的建模和数值分析计算;

(2) 由仿真结果可以看出, 多目标遗传算法是约束阻尼减振的一种可靠优化手段, 能够避免局部最优解, 优化约束阻尼结构能够有效降低梁的振幅, 使振动在较短时间内达到为稳定;

(3) 敷设较长阻尼层不一定能达到较好的减振目的, 引入太多阻尼材料不仅增加了结构的重量, 而且降低了系统的刚度, 所以要限制较多的阻尼材料引入系统.

参考文献

- 1 戴德沛等. 阻尼技术的工程应用. 北京: 清华大学出版社, 1991
- 2 孙庆鸿等. 振动与噪声的阻尼控制. 北京: 机械工业出版社, 1993
- 3 Swallow W. An improved method of damping panel vibrations. *British Patent Specification*, 1939, 513171
- 4 Cai C, Zheng H, Liu GR. Vibration analysis of a beam with PLCD patch. *Applied Acoustics*, 2004, 65: 1057-1076
- 5 Baz A, Ro J. Optimum design and control of active constrained layer damping. *Trans ASME: Special 50th Anniversary Design Issue*, 1995, 117: 135-144
- 6 Chen YC, Hunag SC. An optimal placement of CLD treatment for vibration suppression of plates. *Int J Mech Sci*, 2002, 44: 1801-1821
- 7 Wang G, Wereley NM. Spectral finite element analysis of sandwich beams with passive constrained layer damping. *ASME*, 2002, 124: 376-386
- 8 Hwang SJ, Gibson RF. The use of strain energy-based finite element techniques in the analysis of various aspects of damping of composite materials and structures. *J Compos Mater*, 1992, 26(17): 2585-2605
- 9 Slater JC, Belvin WK, Inman DJ. Survey of modern methods for modeling frequency dependent damping in finite element models. In: *Proceedings of SPIE the international society for optical engineering*. Kissimmee FL, USA: Society for Experimental Mechanics, 1993. 1508-1512
- 10 Ungar EE, Kerwin Jr EM. Loss factors of viscoelastic systems in terms of strain energy. *J Acoust Soc Am*, 1962, 34(2): 954-958
- 11 金斯伯格 JH 著. 机械与结构振动. 白化同, 李俊宝译. 北京: 中国宇航出版社, 2004
- 12 Marcelin JL. Evolutionary optimization of mechanical structures: towards an integrated optimization. *Engineering with Computers*, 1999, 15: 326-333

(责任编辑: 张 静)