

文章编号: 1000-5013(2007) 03-0341-04

分支电路压电阻尼减振技术的电路参数优化

杨长洲, 童 昕, 黄庆专, 刘 俊

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 通过建立半主动压电可控悬臂梁有限元模型, 进一步采用精细时程积分法求解各节点的挠度和转角. 以分支电路中电感和电阻值为设计变量, 梁有限元模型动端点处节点位移振幅为目标函数, 使用遗传算法优化电路中的电感和电阻, 得到不同激励频率下分支电路的最优参数值. 优化结果表明, 当电感和电阻为最优值时, 动端点的振幅都比其他情况下的振幅小; 当激励频率和分支电路谐振频率相等时, 动端点振幅并不是最小的, 即最优电感比谐振频率下的电感值小.

关键词: 半主动压电阻尼; 振动控制; 有限元; 分支电路; 悬臂梁结构; 遗传算法

中图分类号: TP 212; TM 135; TB 535; Q 348

文献标识码: A

目前, 采用压电元件进行振动控制的方法主要有被动控制、主动控制和半主动控制, 相比较而言, 半主动压电阻尼技术对外部环境变化具有良好的适应性, 而且不需要外部高电压能源, 具有独特的优势. 半主动压电阻尼技术关键在于电路参数的选择, 不同的电路参数组合对减振效果有着非常显著的影响. 针对采用压电元件进行振动控制的优化研究, 主要集中在压电片数目及压电片在结构体上的位置分布优化^[1-3], 而对于半主动分支电路压电振动控制的电路参数优化方面的研究较少. 文[4]定性分析了分支电路中电路参数的选择, 但只大致给出了电感的最优值, 没有电阻的优化值, 这给控制造成了一定的困难. 本文首先建立半主动分支电路振动控制有限元模型, 然后采用精细时程积分法进行求解, 并通过遗传算法对电路中电感和电阻进行优化.

1 振动控制有限元模型的建立

半主动压电可控的悬臂梁结构, 如图 1 所示. 图 1 中, 压电片对称贴在铝梁两侧, 其中一片压电片作为作动器, 另一片作为传感器. 压电作动器外接分支电路, 而分支电路由可调电感和可调电阻串联组成; 控制器采集到压电传感器的信号之后, 调整可调电阻值和可调电感值.

首先, 我们给出如下 5 点假设. (1) 各层横向位移相同. (2) 各层之间粘贴良好, 位移完全连续. (3) 转动惯量不计, 忽略压电层和基梁的剪切变形. (4) 线弹性及线性压电关系. (5) 忽略压电片的重力. 因此, 对悬臂梁使用变分原理, 有

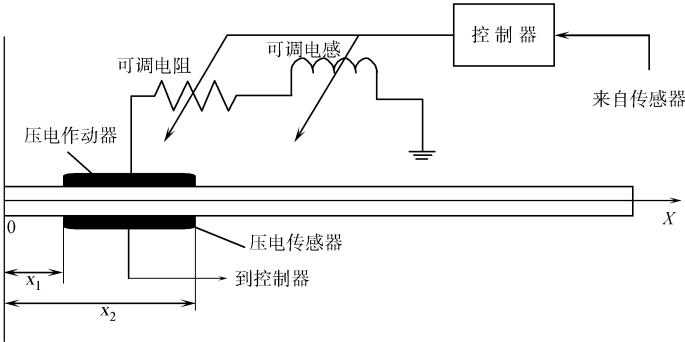


图 1 半主动压电可控的悬臂梁结构图

Fig. 1 Cantilever beam's architecture of semi active vibration control using piezoelectric

收稿日期: 2006-11-25

作者简介: 杨长洲(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事机械振动控制的研究; 通信作者: 童 昕(1964-), 男, 教授, E-mail: ccq@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(E0510020)

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta T_b + \delta T_s - \delta U_b - \delta U_s + \delta W_s + \delta W_p + \delta W_f) dt = 0 \tag{1}$$

上式中, T_b 为基梁的动能, T_s 为两块压电陶瓷片的横向动能, U_b 为基梁的势能, U_s 为两块压电陶瓷片的势能, W_s 为两块压电陶瓷所作的电虚功, W_p 为阻尼力所做的虚功, W_f 为外力所作的虚功.

通过建立半主动压电阻尼悬臂梁的本构方程、变形协调方程、边界条件、初始条件和分支电路方面的基本方程, 以及对式(1)中各项分别进行计算, 可以得到半主动压电阻尼悬臂梁的连续方程. 进一步通过插值形函数, 把得到的连续方程离散成有限元方程, 有

$$M\dot{v} + C\dot{v} + Kv = P + \frac{h_{31}b_sS_s}{\beta_{33}h_s}B(-IR - \frac{d(LI)}{dt}), \quad \frac{d^2(LI)}{dt^2} + \frac{d(RI)}{dt} \frac{\beta_{33}h_s}{b_sL_e} \frac{h_{31}S_s}{L_e}. \tag{2}$$

上式中, M, C, K 分别为梁结构的质量阵、阻尼阵、刚度阵. P 为 $p = \int_0^e fN^T dx$ 的集成, B 为 $b = \int_0^e (N'')^T dx$ 的集成; N 为插值形函数, I 为分支电路中电流, v 为总体位移向量, L, R 分别为分支电路电感和电阻; $S_s = \frac{1}{2}h_s(h_b + h_s)$, h_b 为梁厚度, h_s, b_s 分别为压电片高度和高度; h_{31} 为压电劲度系数, β_{33} 为受夹介质隔离率, L_e 为单元长度. 联立方程(2) 可得

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{I} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C & h_{31}h_bS_bLB/\beta_{33}L_e \\ h_{31}S_sB^T/L_e & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & h_{31}b_sS_sRB/\beta_{33}L_e \\ 0 & \beta_{33}S_s/b_sL_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{3}$$

把电流和节点位移及转角集成在一个方程组里得到扩展整体质量阵、扩展整体阻尼阵和扩展整体刚度阵. 令 $M_k = \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix}$, $C_k = \begin{bmatrix} C & h_{31}h_bS_bLB/\beta_{33}L_e \\ h_{31}S_sB^T/L_e & R \end{bmatrix}$, $K_k = \begin{bmatrix} K & h_{31}b_sS_sRB/\beta_{33}L_e \\ 0 & \beta_{33}S_s/b_sL_e \end{bmatrix}$, $P_k = \begin{bmatrix} P \\ 0 \end{bmatrix}$, $\ddot{v} = \begin{bmatrix} \ddot{v} \\ \ddot{I} \end{bmatrix}$, $\dot{v} = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{I} \end{bmatrix}$, $v = \begin{bmatrix} v \\ I \end{bmatrix}$. 则方程(3) 改写成

$$M_k\ddot{v} + C_k\dot{v} + K_kv = P_k. \tag{4}$$

方程(4) 为二阶微分方程组, 各微分变量耦合在一起, 直接求解很困难. 本文把方程(4) 转换成状态方程, 使方程(4) 的阶数降至一阶, 然后采用精细时程积分法, 不仅使解的精度高, 而且也使程序的运行速度快几倍. 令 $U = \begin{bmatrix} v \\ \dot{v} \end{bmatrix}$, $H = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_k^{-1}K_k & -M_k^{-1}C_k \end{bmatrix}$, 则 $\dot{U} = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \ddot{v} \end{bmatrix}$. 其中 I 为单位方阵, $F = \begin{bmatrix} 0 \\ M_k^{-1}P_k \end{bmatrix}$, 方程(4) 转换成一阶微分方程组为

$$\dot{U} = HU + F. \tag{5}$$

采用精细时程法^[5-6], 可以得到方程的解的递推公式为

$$U = TU_k + \int_{t_k}^{t_{k+1}} e^{H(t_{k+1}-\tau)} F(\tau) d\tau \tag{6}$$

$$\int_{t_k}^{t_{k+1}} e^{H(t_{k+1}-\tau)} F(\tau) d\tau = \frac{\Delta t}{90} \begin{bmatrix} 7TF(t_k) + 32T_1F(t_k + \frac{1}{4}\Delta t) + 12T_2F(t_k + \frac{1}{2}\Delta t) + \\ 32T_3F(t_k + \frac{3}{4}\Delta t) + 7F(t_k) + O(\Delta t^5) \end{bmatrix}. \tag{7}$$

在上两式中, $\Delta t = t_{k+1} - t_k$, $T = \exp(H\Delta t)$, $T_1 = \exp(H\frac{3}{4}\Delta t)$, $T_2 = \exp(H\frac{1}{2}\Delta t)$, $T_3 = \exp(H\frac{1}{4}\Delta t)$. 设悬臂梁各节点位移及转角和分支电路中电流初始状态都为零, 给定一个时间间隔, 通过不断的迭代, 可以得到不同时刻梁的位移, 以及分支电路的电流. 当时间间隔设定足够小时, 使用精细时程积分法可以得到所需的精度.

2 基于改进遗传算法的电路参数优化

在前面得到的方程(5) 中, 以分支电路电感 L 和电阻 R 为设计变量. 这是一个非线性无约束优化问题, 目标函数与设计变量之间没有显式函数关系, 目前有不少这类问题的优化方法. 由于方程(5) 的计算量很大, 计算时间也比较长, 而遗传算法具有快速、高效的特点^[7], 且与问题无关性, 故本文采用改进遗

传算法进行优化.

2.1 编码方式

由于二进制编码存在很多问题, 比如对高精度问题, 其编码长度太长, 经常需要 500 到 5 000 个码位, 同时对问题空间进行编码时消耗了相当多的系统时间. 本文采用实数编码^[8], 这样不需要对问题解编码, 提高了计算速度, 同时降低了内存的消耗.

2.2 初始化种群

单种群简单, 易实现, 但它是生物进化的一种简化, 没有充分运用到自然界种群生物进化的原理. 本文采用多种群小生遗传算法^[9-10], 引进环境竞争的概念, 使得遗传算法更接近自然. 这样可以避免早熟, 提高寻优能力, 具有更多的优点.

2.3 适应度函数的选择

适应度函数有两种选择. 一种是稳态振动时, 以离散成单元的梁上某个节点的振动幅值 A_i 为适应度函数; 另一种是稳态振动时, 以一个振动周期内分支电路的电阻消耗能量与损耗因子为目标函数. 损耗因子是电感、电容存储的能量之和 E_f 与梁机械能 E_b 的比值. 后一种选择需要计算 3 个能量值, 计算量很大, 影响优化速度. 通过仿真计算可以验证, 在固定激励频率的情况下, 梁单元上各个节点位移幅值基本保持一定的比例, 这样采用梁上某个节点的振动幅值 A_i 为适应度函数, 误差不会太大.

本文采用的交叉算子形式为单纯形交叉方式, 具有一定的智能, 可以提高遗传算法的寻优能力.

3 优化算例

按照上述模型、算法及优化准则, 对半主动压电可控的悬臂梁中分支电路参数的电感 L 和电阻 R 进行优化. 有关参数: $x_1=4\text{ cm}$, $x_2=8\text{ cm}$, $h_s=0.1\text{ cm}$, $b_s=2\text{ cm}$, $b_b=2.2\text{ cm}$, $h_b=0.25\text{ cm}$, $\rho_b=2\,550\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho_s=7\,450\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $c_b=0.15\text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\beta_{33}=70\text{ MV}\cdot\text{m}\cdot\text{C}^{-1}$, $h_{31}=760\text{ MN}\cdot\text{C}^{-1}$, $C_P=11.429\text{ nF}$. 种群规模为 100, 种群个数为 3, 遗传代数为 100, 变异概率为 0.05, 交叉概率为 0.8. 通过优化得到的各个频率下最优电感 L 和最优电阻 R 值, 如表 1 所示. 表中, f_1 为激励频率, f_2 为电路谐振频率, A 为动端点振幅.

表 1 改进遗传算法得到的电路参数优化结果
Tab. 1 The results of circuit's parameters using improved genetic algorithm

| f_1/Hz | f_2/Hz | L/H | R/Ω | A/mm | f_1/Hz | f_2/Hz | L/H | R/Ω | A/mm |
|-----------------|-----------------|--------------|------------|---------------|-----------------|-----------------|--------------|------------|---------------|
| 80 | 83.186 | 320.29 | 574.96 | 0.982 730 | 280 | 288.508 | 26.63 | 81.97 | 0.099 805 |
| 120 | 127.393 | 136.57 | 525.75 | 0.301 130 | 320 | 323.871 | 21.13 | 1 838.47 | 0.093 196 |
| 160 | 166.989 | 79.48 | 203.38 | 0.215 500 | 360 | 368.269 | 16.34 | 199.01 | 0.071 870 |
| 200 | 206.557 | 51.95 | 951.18 | 0.338 620 | 400 | 405.935 | 13.45 | 18.97 | 0.082 804 |
| 240 | 247.893 | 36.07 | 69.34 | 0.512 940 | | | | | |

验证最优电感和最优电阻分两种情况. (1) 电阻为最优值, 改变电感, 计算动端点振幅. (2) 电感为最优值, 改变电阻, 计算动端点振幅, 结果分别如图 2 所示. 图 2 中, s 为动端点位移. 从表 1 可以看出,

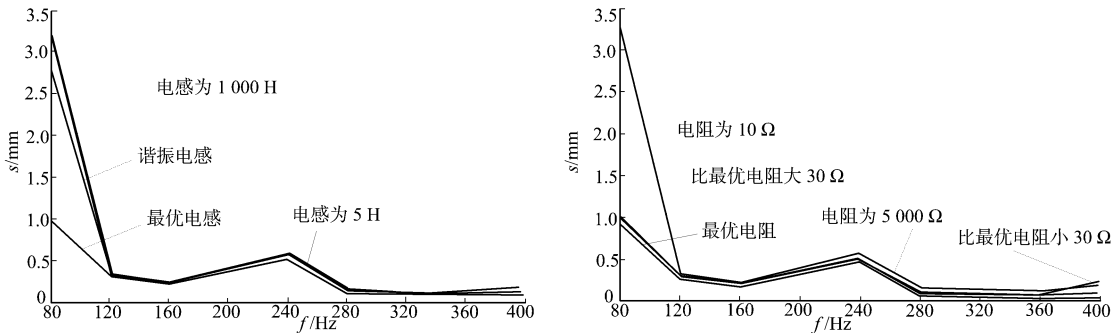


图 2 动端点振幅比较

Fig. 2 Comparison of amplitude of moveable dots

激励频率和分支电路最优电感下谐振频率接近时, 动端点具有最小振幅, 并且电感最优时, 谐振频率总

比激励频率大一些. 从图 2 可知, 当电感和电阻为最优值时, 动端点的振幅都比其他情况下振幅小, 说明了改进遗传算法所得到的最优电感和电阻的正确性. 从图 2 还可以看出, 当激励频率和分支电路谐振频率相等时, 动端点振幅并不是最小的. 换言之, 最优电感并不是谐振频率下的电感, 而是比谐振频率下的电感值小一些.

4 结 束 语

本文通过建立半主动压电可控悬臂梁有限元模型, 以分支电路中电感和电阻值为设计变量, 梁有限元模型动端点处节点位移振幅为目标函数, 使用改进遗传算法, 得到不同激励频率下分支电路的最优参数值. 优化模型解决了半主动压电阻尼减振技术的关键问题, 同时对实践具有一定的指导意义.

参考文献:

[1] 魏燕定, 郭吉丰. 智能梁压电致动器位置布置探讨[J]. 噪声与振动控制, 2000, 20(1): 15-17.
[2] 唐永杰, 胡选利, 张升陞. 振动主动控制中检测器和作动器的最优配置[J]. 西安交通大学学报: 自然科学版, 1995, 29(7): 21-28.
[3] 严天宏, 牟全臣, 王建宇. 并置压电传感/ 作动器的最优配置及反馈增益研究[J]. 振动工程学报, 1999, 12(4): 570-576.
[4] HAGOOD N W, VON F A. Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks[J]. Sound Vib, 1991, 146(2): 243-268.
[5] 储德文. 结构动力响应的精细时程积分法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2002: 17-29.
[6] 刘 岩. 基于精细时程积分的结构动力响应降价分析[D]. 北京: 北京工业大学, 2003: 17-36.
[7] 刑文训, 谢金星. 现代优化计算方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 140-191
[8] 田小梅, 龚 静. 实数编码遗传算法的评述[J]. 湖南环境生物职业技术学院学报, 2005, 11(1): 25-31.
[9] 吴养会, 王乃信, 刘瀛洲. 多种群竞争遗传算法及其性能分析[J]. 西北农业科技大学: 自然科学版, 2005, 33(4): 154-156.
[10] 李 凡, 黄数林, 张东风. 一种改进的多倍体遗传算法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33(1): 16-18.

Parameter Optimization of Piezoelectric Damping Vibration
Technology with Shunted Circuits

YANG Chang-zhou, TONG Xin, HUANG Qing-zhuan, Liu Jun

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: This paper sets up a finite element model of the cantilever beam of semi-active vibration control using piezoelectric, then solves the model in precise time step integration method. Taking the inductance and resistance of shunted circuit as design variables and the amplitude of the displacement of the last move node of the cantilever beam as target value, we obtain the different optimum shunted circuit's parameters in different motivation frequencies using modified genetic algorithm. The optimum results show that the displacement of the last move node of the cantilever beam within the optimum inductance and resistance is lower than that without these. When incentive frequency equals to shunted circuit's resonant frequency, the displacement of the last move node is not the lowest, in other words, the optimum inductance is lower than resonant inductance.

Keywords: semi-active piezoelectric damping; vibration control; finite element; shunted circuit; cantilever structure; genetic algorithm

(责任编辑: 黄仲一)