

文章编号 1000-5013(2006)01-0079-03

# 具有分支电路的半主动可控压电阻尼减振

刘 俊 童 昕

(华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

**摘要** 分支电路系统中不同电器元件及其不同布置组合, 可以构成不同的半主动压电阻尼系统. 文中给出一种新型的半主动分支电路的可控压电阻尼技术, 并以一个悬臂梁为例, 对该方法的有效性进行验证. 对悬臂梁处在不同模态或不同位置单个传感器的情况, 通过调节可变电容, 使电路的振荡频率和模态频率相吻合, 从而得到振幅减少的百分比和最佳传感器位置.

**关键词** 压电阻尼, 分支电路, 可控减振, 半主动控制

**中图分类号** TB 535+.1

**文献标识码** A

压电材料的机电耦合特性, 使其在结构的智能化和振动控制中得到了广泛应用. 国内外在主动、被动和主被动控制方面的研究比较多, 主要原因在于带有主动控制的作用器能够有效地抑制结构的振动. 但是, 它也带来了高电压和复杂结构的弊端. 在很多情况下, 特别是考虑到系统的安全性和节能方面, 具有分支电路的可控压电阻尼技术, 其结构的振动抑制和振动控制受到人们的重视. 这种技术的基本原理是, 将压电元件与并联的分支电路组成一个完整的分支电路压电阻尼系统. 通过选定不同的分支电路形式, 不同电路电器元件(电阻元件、电容元件和电感元件等)的组合形式和参数大小的选择, 形成了一种新型的可控压电阻尼技术, 可以对结构系统的振动进行半主动的控制. 国内对具有分支电路的半主动可控压电阻尼减振技术的研究甚少. 本文采用了一种新型的分支电路, 对悬臂梁进行有效的半主动振动控制. 首先, 给出半主动控制系统的数学模型, 然后给出分支电路的选择, 以及如何去有效抑制悬臂梁的振动. 接着, 对悬臂梁不同模态下的振动效果进行了仿真. 结果表明, 这是一种有效的抑制技术.

## 1 系统的数学模型

以悬臂梁为例的半主动分支电路的可控压电阻尼减振系统, 如图 1 所示. 对属于分布参数系统的工程结构来说, 理论上需要采用偏微分方程描述其运动形式. 但实际上, 往往采用有限元方法对其离散化, 从而建立用常微分方程表达的控制模型<sup>[1~3]</sup>. 即

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{q} + M_c\dot{q} + Kq &= Bf + F_d, \\ y &= C_d q + Df + D_d F_d. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

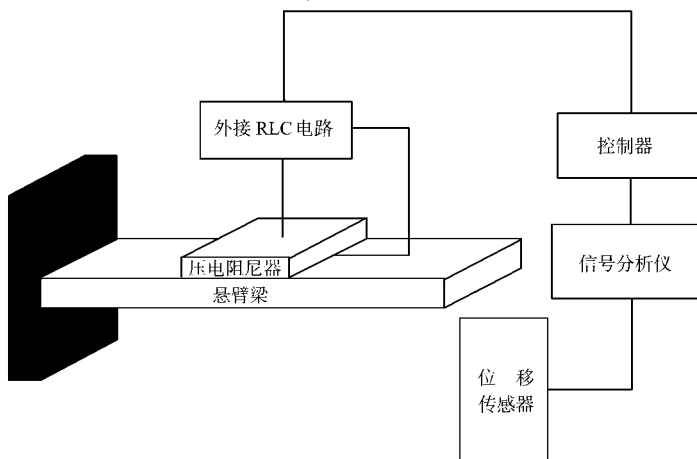


图 1 具有分支电路的半主动可控压电阻尼系统

**收稿日期** 2005-05-08

**作者简介** 刘 俊(1980-), 男, 硕士研究生, 主要从事动态分析与动态设计的研究. E-mail: liujun1898@hqu.edu.cn

**基金项目** 福建省自然科学基金资助项目(E0510020)

在式(1)中,  $q$  为  $n \times 1$  的位移向量,  $M$  为  $n \times n$  的对称正定质量矩阵,  $C$  为阻尼矩阵,  $K$  为  $n \times n$  非负定对称刚度矩阵,  $n$  为自由度数,  $B$  为  $n \times r$  ( $r$  为传感器的个数) 压电阻尼器对悬臂梁的影响矩阵, 包括压电阻尼器的刚度、位置及并联在压电阻尼器两端的 RLC 电路对悬臂梁的影响. 本文采用一个位移传感器 (即  $r=1$ ),  $f$  为压电阻尼器对悬臂梁的作用力;  $C_d$  为输出系数矩阵,  $F_d$  为外扰力,  $D$  为压电阻尼器的作用项,  $y$  为标量. 根据模态叠加原理, 将系统响应表示成

$$q = \sum_{i=1}^n \phi_i q_i = \Phi \mathbf{q}_i, \quad (2)$$

在式(2)中,  $\phi_i$  为第  $i$  阶振型向量,  $\mathbf{q}_i = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]^T$ ,  $q_i$  为第  $i$  阶模态坐标,  $\mathbf{q}_i = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ . 将式(2)代入式(1), 可得到

$$\ddot{\mathbf{q}}_i + D_r \dot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{q}_i = \mathbf{B}^T \mathbf{B} f + \mathbf{B}^T F_d, \quad (3)$$

$$y = C_d \mathbf{q}_i + Df + D_d F_d = \bar{C}_d \mathbf{q}_i + Df + D_d F_d.$$

这里  $D_r = \text{diag}(2\zeta_1\omega_1, 2\zeta_2\omega_2, \dots, 2\zeta_n\omega_n)$ ;  $\mathbf{B}^T \mathbf{B}$  为  $n \times 1$  压电阻尼器影响系数矩阵,  $\bar{C}_d$  为传感器位移影响系数矩阵,  $\zeta_i$  和  $\omega_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 为系统的模态阻尼比及频率.

一般情况下, 有限元模型的模态数  $n$  较多, 进行模态试验时, 往往只对远小于  $n$  的  $n_t$  个模态感兴趣. 因此, 式(3)可表示为

$$\ddot{q}_i + 2\zeta_i\omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = \mathbf{B}_i^T \mathbf{B} f + \mathbf{B}_i^T F_d =$$

$$f_i + \mathbf{B}_i^T F_d, \quad i = 1, 2, \dots, n_t,$$

$$y = \sum_{i=1}^{n_t} C_{di} q_i + Df + D_d F_d = \sum_{i=1}^{n_t} C_{di} q_i + Df + D_d F_d.$$

模态试验的目的就是通过合理地选取并联在压电阻尼器两端的电路参数, 以确定  $\zeta_i$ , 合理选择传感器的位置以确定  $C_{di}$  向量, 从而尽可能大地消除感兴趣模态下的振动, 达到控制要求.

## 2 分支电路的选择和消振原理

文中将利用电阻和电感的分支电路对系统进行减振, 电阻和电感并联的分支电路比串联分支电路更容易调谐. 这种新的分支电路的饱和电阻和电感可以单独改变, 调整饱和电阻不影响电路的共振频率<sup>[4]</sup>. 压电阻尼器粘贴于梁结构表面, 压电阻尼器两表面电极之间的电压为<sup>[5]</sup>

$$V_s = \frac{E_p b D_e d_{31}}{C_p} [w(x_2) - w(x_1)].$$

在上式中,  $E_p$  为压电材料的弹性模量,  $d_{31}$  为压电应变系数,  $b$  为压电阻尼器宽度,  $D_e$  为压电阻尼器中面到梁中性层的距离,  $C_p$  为压电阻尼器在常应变下的电容.  $R, L, C$  组合的电路, 如图 2 所示. 电路的谐振角频率为

$$\omega_0 = \frac{R}{\sqrt{PLC - L^2}} = \frac{R}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{C}{RC - L}},$$

$$C = \frac{C_p G}{C_p + G}.$$

谐振时, 电路的阻抗  $|Z| = L/RC$ . 其中  $G$  为可调电容,  $R, L$  的选择要根据我们关心的模态频率, 以及可变电容的可变范围来选择.

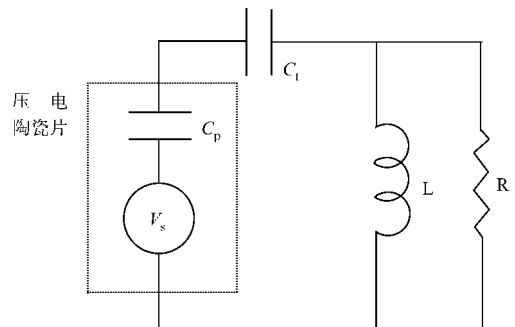


图 2  $R, L, C$  组合的分支电路

## 3 悬臂梁在不同模态下的振动效果的仿真

对悬臂梁在 3 种不同模态下, 用正弦激励进行振动位移结果仿真, 对传感器处在 3 种不同位置下所得到的结果作比较. 首先是确定传感器的位置, 然后通过调节可变电容使电路的振荡频率和不同模态下的模态频率相吻合, 从而得到振幅减少的百分比, 控制结果如表 1 所示. 显然, 这种具有新型分支电路的半主动可控压电阻尼减振技术, 能够对悬臂梁进行有效地抑制. 利用有限元网格对悬臂梁划分, 以确定

悬臂梁上阻尼器的具体位置,通过对该阻尼器的减振效果进行深入试验,得到如表2所示的结果.表2的是各阶模态下只布置单个阻尼器时,阻尼器的最优位置.其中 1~9 为网格编号.表 2 中,1 表示在该位置布置有阻尼器;没有 1 的位置表示没有布置阻尼器.从表中可以看出,在各阶模态中,阻尼器的最佳位置趋近于在振型曲率较大的位置处.当同时综合考虑 4 阶弯曲模态的振动控制时,布置 1 个阻尼器时,最佳位置是 4.

表 2  悬臂梁上压电阻尼器的布置位置

| 模态频率   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 一阶模态   |   | 1 |   |   |   |   |   |   |   |
| 二阶模态   |   |   |   |   | 1 |   |   |   |   |
| 三阶模态   |   |   |   |   |   |   | 1 |   |   |
| 四阶模态   |   |   |   |   | 1 |   |   |   |   |
| 全部四阶模态 |   |   |   | 1 |   |   |   |   |   |

4  结束语

(1) 文中采用的是只有一个压电阻尼器的情况,但在实际控制当中,多个传感器往往比一个控制的结果要好,需要进一步对多个传感器的情况进行研究.(2) 通过控制器调节可变电容,使电路的振荡频率和不同模态下的模态频率相同.但是,没有考虑到位移传感器的环节对真实位移的影响,需要对在任意位置的压电阻尼器带来的可控性做进一步研究.(3) 在振动控制中,控制系统的性能不仅与压电阻尼器的位置有关,而且与控制增益有关.进一步考虑到控制增益,是一个值得研究的问题.

参    考    文    献

1  陶宝祺.智能材料结构[M].北京:国防工业出版社,1997.57~84  
2  顾仲权,马扣根,陈卫东.振动主动控制[M].北京:国防工业出版社,1997.12~26  
3  刘福强,张令弥.作动器/传感器优化配置的研究进展[J].力学进展,2000,30(4):506~516  
4  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):389~402  
5  任兴仑.振动控制的主被动混合阻尼结构的研究[D].[学位论文].泉州:华侨大学机电及自动化学院,2001.12~16

Shock Absorption by Semiactive Controlled Piezoelectric  
Damping with Branch Circuit

Liu Jun    Tong Xin

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

**Abstract** Different semiactive system of piezoelectric damping can be obtained using different components of electric appliance with different collocations and combinations in a branch circuit system. A new method of controlled piezoelectric damping is proposed, and its effectiveness is verified by a case study. This case study is presented under the circumstances that the cantilever beam is in different modes or single transducer is in different positions, to find that oscillation frequencies of the circuit system can be well fit for the mode frequencies by regulating the variable capacitors, and thus, the percentage of decreased amplitude and the optimal position of transducer can be obtained.

**Keywords** piezoelectric damping, branch circuit, controlled shock absorption, semiactive control