压电悬臂梁智能元数字仿真模型设计及分析

王 雷 任秉银 邹鸿生

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001) (浙江大学 航空航天学院, 杭州 310027)

摘 要: 针对在薄壳结构上层合压电传感器与作动器的智能结构系统进行振动控制问题,提出了一种专用的数字电路化智能元仿真模型进行振动特性分析的新方法. 以压电悬臂梁系统为例,利用有限差分方法将主体结构、压电传感信号及压电控制力矩的动力学偏微分方程转化为智能元差分方程;建立基于 Newmark-β 积分方法的智能元数学矩阵模型;在 DSP 数字电路系统上设计智能元仿真系统;对不同差分密度和积分时间步长下系统各个模态的输出特性进行了分析,并与相关文献中采用不同控制方法的模拟电路仿真结果进行了比较,取得了更精确的结果. 该方法为压电结构系统的振动特性仿真分析提供了新途径.

关 键 词: 智能结构技术; 仿真模型; 振动控制; 有限差分; 数字电路

中图分类号: O 326; TP 331.2

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)08-1070-05

Digital simulation model design and analysis of piezoelectric cantilever beam smart elements

Wang Lei Ren Bingyin

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Zou Hornsen

(School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: According to the vibration control of piezoelectric laminated structronic thin shell system, a new method for vibration characteristic analysis by using special digital circuit model of smart elements was presented. By means of the finite difference discretization method, the dynamic partial differential equations of the cantilever beam, sensing signal and piezoelectric control moments were transformed to finite difference equations. Dynamics smart elements matrix model based on Newmark-β integration method was established. DSP circuits of smart element simulation systems were fabricated to simulate the output characteristics of the piezoelectric structronic cantilever beam systems under lower modes with different finite difference mesh elements and different integration time steps. The results with different control methods are more precise than that of the analog circuit model in relevant reference. This method provides a new approach for the vibration simulation analysis of piezoelectric structronic systems.

Key words: smart-structure technology; simulation model; vibration control; finite difference; digital circuits

柔性薄壁结构是航空航天领域重要的发展方向,近年来国内外学者对以压电材料作为传感器及作动器的智能结构系统的振动控制问题进行了大量的研究工作[1-5].

智能结构系统的物理模型实验测试过程中很难改变智能材料的尺寸及布置位置;材料的粘合

收稿日期: 2011-05-25; **网络出版时间**: 2012-08-23 14:55

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120823.1455.022.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175103/ 51105095)

作者简介: 王 雷(1982-),男,辽宁丹东人,博士生,wangleigood@163.com.

水平及测试精度甚至环境噪声都会影响实验结果;此外经过反复的实验测试后模型会有一定程度的疲劳破坏:故对其进行仿真是必要的.

智能结构系统的建模及仿真大体有 4 种方法:①有限元软件仿真;②Matlab 软件仿真;③模拟电路仿真;④数字电路仿真.

文献[6]用有限元软件对分布式压电悬臂梁和板结构系统建模并研究最大控制力问题;虽然该方法具有诸多优点,但随着结构越复杂以及划分单元越多,动态分析计算时间过长. 文献[7]基于剪应变理论对压电层合梁利用 Matlab 软件进行振动响应分析;Matlab 法的缺点是很难建立复杂的仿真模型. 文献[8]利用有限差分方法对压电智能梁以及板结构系统的 PZT(锆钛酸铅)压电陶瓷激励器进行模拟电路仿真. 文献[9 – 10]对压电智能控制下的悬臂梁动力学系统采用有限差分方法进行模拟电路化仿真并进行位移反馈和速度负反馈控制测试. 模拟电路同样难以构建复杂模型,并且模拟电路元件存在零漂、响应速度低等缺点,放大倍数有限,限制了振动控制仿真的分析精度.

目前采用数字电路的仿真研究很少,数字电路的大存储空间和高运算速度/精度可以使仿真模型的离散化密度更高,并且改变模型参数简便,为对更复杂物理结构模型的振动控制仿真提供保障.

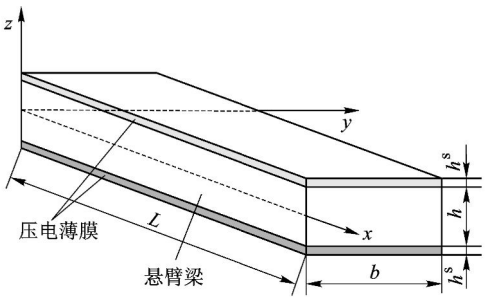
本文提出了针对于压电悬臂梁智能结构系统多模态振动控制的专用智能元仿真模型,采用有限差分法将压电悬臂梁结构系统的主体结构、传感及控制的连续高阶动力学偏微分方程转化为离散化智能元常微分方程并建立智能元数学矩阵模型,进而基于 Newmark-β 积分方法在 DSP 数字电路上设计智能元仿真模型,进行了 2 种不同反馈控制下的振动特性分析,取得比采用模拟电路元件来构造等效电路化模型更精确的结果.

1　悬臂梁主体结构的数学矩阵模型

如图 1 所示的弹性欧拉-柏努利悬臂梁,分别完全布置了厚度为 h^{S} 和 h^{a} 的作为传感器/作动器的压电薄膜. 不考虑压电薄膜惯量和刚度以及梁结构阻尼和温度变化所产生的影响,由文献[9]可知在受到外部激励和压电控制力矩时,沿着梁长度 x 方向上某点的动力学偏微分方程可表示为

$$YI\frac{\partial^4 u_3}{\partial x^4}+\rho A\ddot{u}_3-\frac{b\partial^2(M_{11}^{a})}{\partial x^2}=bF_3 \qquad (1)$$

其中,Y 为杨氏模量;ρ 为密度;梁横截面面积 $A=bh$;M_{11}^{a} 为压电作动器产生的控制力矩;u_3 为该点在 z 方向的实时位移;F_3 为垂直外力;常量 $I=bh^3/12$.



L—梁长度;b—宽度;h—厚度.

图 1　压电悬臂梁智能结构系统

将如图 2 所示的梁沿着长度 x 方向等分为 m 段,每段长度为 $\Delta x=L/m$. 段间节点序号为 i,悬臂梁固定端的节点号为 $i=0$,外侧自由端节点号为 $i=m$,各节点的垂直位移用 $u_{3,0}\sim u_{3,m}$ 表示.

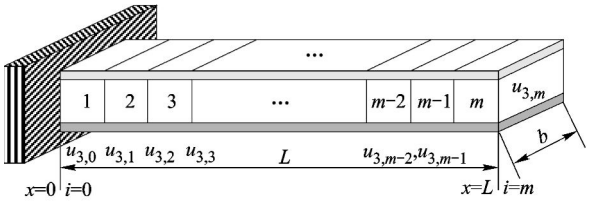


图 2　有限差分后的压电悬臂梁智能结构系统

先不考虑压电薄膜对悬臂梁施加的控制效应,节点 i的动力学偏微分方程可利用中心有限差分法转化为常微分方程:

$$\frac{Yh^3}{12(\Delta x)^4}(u_{3,i+2}-4u_{3,i+1}+6u_{3,i}-4u_{3,i-1}+u_{3,i-2})+\rho h\frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2}=F_{3,i} \qquad (2)$$

需要在悬臂梁的固定端和自由端的外侧虚拟出 3 个节点 $i=-1,m+1,m+2$. 将各节点的有限差分方程联立成为一个非齐次方程组如下:

$$\begin{bmatrix} 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \end{bmatrix}_{m\times(m+4)} \times \begin{bmatrix} u_{3,-1} \\ \vdots \\ u_{3,i} \\ \vdots \\ u_{3,m+2} \end{bmatrix} \frac{Yh^3}{12(\Delta x)^4}+\rho h\begin{bmatrix} \ddot{u}_{3,1} \\ \vdots \\ \ddot{u}_{3,i} \\ \vdots \\ \ddot{u}_{3,m} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} F_{3,1} \\ \vdots \\ F_{3,i} \\ \vdots \\ F_{3,m} \end{bmatrix} \qquad (3)$$

悬臂梁结构系统的边界条件为

固定端

$$\left.\begin{aligned} u_{3,0} &= 0 \\ \partial u_{3,0}/\partial x &= 0 \Rightarrow u_{3,-1} = u_{3,1} \end{aligned}\right\} \tag{4a}$$

自由端

$$\left.\begin{aligned} \partial^2 u_{3,m}/\partial x^2 &= 0 \Rightarrow u_{3,m+1} = 2u_{3,m} - u_{3,m-1} \\ \partial^3 u_{3,m}/\partial x^3 &= 0 \\ \Rightarrow u_{3,m+2} &= 2u_{3,m+1} - 2u_{3,m-1} + u_{3,m-2} \\ \Rightarrow u_{3,m+2} &= 4u_{3,m} - 4u_{3,m-1} + u_{3,m-2} \end{aligned}\right\} \tag{4b}$$

在考虑边界条件后,式(3)中左侧系数矩阵可转化成为 $m \times m$ 的方阵,得到在非受控情况下的系统数学矩阵模型,该模型可表示为一个类似多自由度弹性体系的无阻尼振动方程组的形式:

$$\boldsymbol{K}_0 \boldsymbol{u}_{3,i} + \boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}}_{3,i} = \boldsymbol{F}_{3,i} \tag{5}$$

其中,$\boldsymbol{K}_0$ 为 $m \times m$ 的初始刚度矩阵;$\boldsymbol{M}$ 为质量矩阵,$\boldsymbol{M} = \rho h \times \boldsymbol{E}$,$\boldsymbol{E}$ 为单位阵;其余为单列阵.

2 压电悬臂梁的智能元矩阵模型

假设距离节点 $\Delta x/2$ 范围内的位移 u_3 及几何结构特性都与该节点等同,整个梁是由 $m+1$ 个子区域构成,处于边界的区域为 $\Delta x/2$,其余的为 Δx. 涵盖了结构本体/传感器/作动器的子区域称为一个智能元. 通过分析单个智能元的运动、传感、控制力/力矩特性,建立相互之间的动力学关系,最终建立整体智能元矩阵模型.

2.1 智能元传感信号的离散化解析

由文献[11]可知,完全布置在悬臂梁表面的压电传感器的传感信号积分方程为

$$\phi^{\mathrm{S}} = -\frac{h^{\mathrm{S}}}{L}\int_L \left(h_{31} r_1^{\mathrm{S}} \frac{\partial^2 u_3}{\partial x^2} \right) \mathrm{d}x \tag{6}$$

其中,$r_1^{\mathrm{S}} = (h^{\mathrm{S}} + h)/2$ 是传感器与悬臂梁中位面之间的距离;h_{31} 是压电常数.

利用二阶有限差分将传感信号分解为各个智能元传感信号的叠加值:

$$\begin{aligned} \phi^{\mathrm{S}} &= \sum_{i=0}^{m} \phi_i^{\mathrm{S}} = \\ &-\frac{h^{\mathrm{S}} h_{31} r_1^{\mathrm{S}} \Delta x}{L} \left(\frac{u_{3,1} - 2u_{3,0} + u_{3,-1}}{2(\Delta x)^2} + \right. \\ &\frac{u_{3,m+1} - 2u_{3,m} + u_{3,m-1}}{2(\Delta x)^2} + \\ &\left. \sum_{i=1}^{m-1} \frac{u_{3,i+1} - 2u_{3,i} + u_{3,i-1}}{(\Delta x)^2} \right) \end{aligned} \tag{7}$$

考虑边界条件,得到传感信号的简化解:

$$\phi^{\mathrm{S}} = \frac{h^{\mathrm{S}} h_{31} r_1^{\mathrm{S}}}{L\Delta x}(u_{3,m-1} - u_{3,m}) \tag{8}$$

此方法得到的压电传感信号并不受传感器内部节点位移影响,而是由传感器自由端边界节点位移及边界内侧一个差分长度的节点位移决定.

2.2 控制力矩的离散化解析

由文献[9]可知,压电作动器产生的控制力矩等效集中在自由端.

1) 当位移反馈控制时,控制电压与传感信号成比例放大($\phi^{\mathrm{a}} = G\phi^{\mathrm{S}}$),由力矩平衡得

$$\begin{aligned} u_{3,m+1} &= \\ -Lb(M_{11}^{\mathrm{a}}(L)\Delta x^2/YI) &+ 2u_{3,m} - u_{3,m-1} = \\ u_{\mathrm{c}} &+ 2u_{3,m} - u_{3,m-1} \end{aligned} \tag{9}$$

其中,$M_{11}^{\mathrm{a}}(L) = \tilde{\xi}\,(\partial u_3(L)/\partial x) = \tilde{\xi}\,(\partial u_{3,m}/\partial x)$ 为边界自由端的控制力矩,$\tilde{\xi} = -(Gh^{\mathrm{S}} r_1^{\mathrm{a}} d_{31} \cdot Y_{\mathrm{p}} r_1^{\mathrm{S}} h_{31}/L)$ 是由多个几何和材料参数决定的常数,G 是反馈增益,r_1^{a} 与上一节中 r_1^{S} 类似,d_{31} 是压电常数,Y_{p} 是压电层的杨氏模量. 可得控制信号 u_{c} 为

$$u_{\mathrm{c}} = -12\frac{L\tilde{\xi}\Delta x}{Yh^3}(u_{3,m} - u_{3,m-1}) \tag{10}$$

将式(9)和式(10)整理后代入式(5)中,得到位移反馈控制时的智能元矩阵模型:

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{d}} \boldsymbol{u}_{3,i} + \boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}}_{3,i} = \boldsymbol{F}_{3,i} \tag{11}$$

与非受控模型式(5)相比,受到位移反馈控制后,$\boldsymbol{K}_{\mathrm{d}}$ 随着位移反馈增益 G 的调整而改变,系统刚度及模态特性也相应的产生变化.

2) 当速度负反馈控制时,控制信号被定义为 $\phi^{\mathrm{a}} = G\partial\phi^{\mathrm{S}}/\partial t$,此时由力矩平衡得

$$\begin{aligned} u_{3,m+1} &= \\ Lb(M_{11}^{\mathrm{a}}(L)\Delta x^2/YI) &+ 2u_{3,m} - u_{3,m-1} = \\ -u_{\mathrm{c}} &+ 2u_{3,m} - u_{3,m-1} \end{aligned} \tag{12}$$

其中 $M_{11}^{\mathrm{a}}(L)$ 为边界控制力矩,可转化为以下形式 $M_{11}^{\mathrm{a}}(L) = -\tilde{\xi}\,\partial[(\partial u_3/\partial x)_0^L]/\partial t = -\tilde{\xi}\,\partial[\partial u_{3,m}/\partial x]/\partial t$,其余参数与式(9)相同,$u_{\mathrm{c}}$ 由边界和内侧节点速度之差决定:

$$u_{\mathrm{c}} = -12\frac{L\tilde{\xi}\Delta x}{Yh^3}(\dot{u}_{3,m} - \dot{u}_{3,m-1}) \tag{13}$$

同样的,将式(13)和式(14)整理代入式(5)中,得到压电悬臂梁结构系统的速度负反馈控制时的智能元矩阵模型:

$$\boldsymbol{K}_0 \boldsymbol{u}_{3,i} + \boldsymbol{C}_{\mathrm{v}}\dot{\boldsymbol{u}}_{3,i} + \boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}}_{3,i} = \boldsymbol{F}_{3,i} \tag{14}$$

其中 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{v}}$ 为产生的阻尼阵,与非受控模型(5)相

比,速度负反馈控制改变系统阻尼特性.

3　基于数字电路的智能元仿真模型

明确了受控下智能元矩阵模型最终的刚度矩阵 $\boldsymbol{K}$,阻尼矩阵 $\boldsymbol{C}$,质量矩阵 $\boldsymbol{M}$ 后,得到每个时间步长下的节点位移的算法流程如图 3 所示.

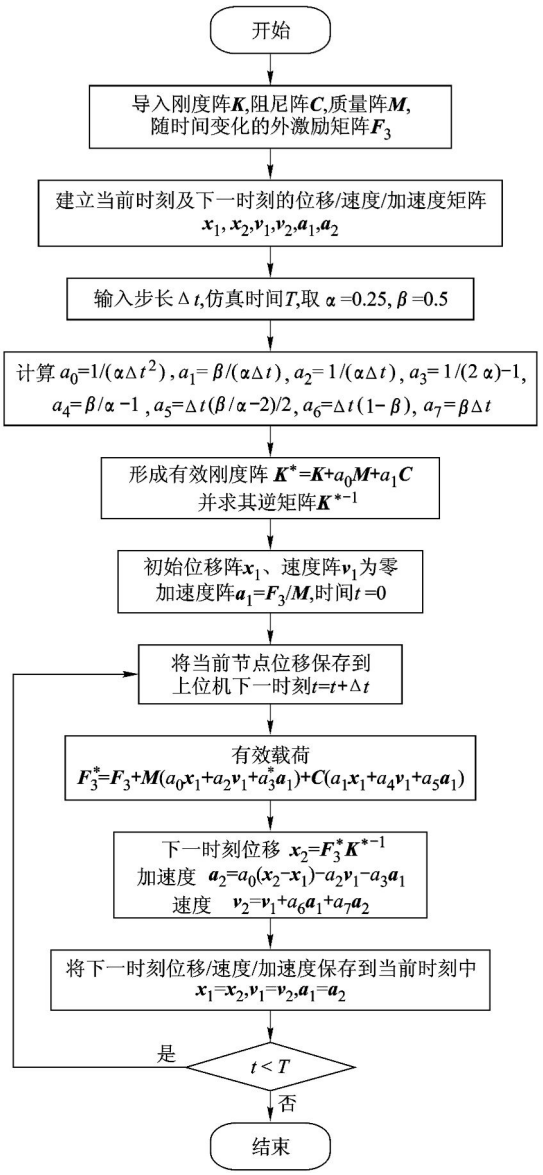


图 3　智能元位移仿真算法流程图

选用数字电路 TMS320C6713 DSP 作为智能元仿真模型的硬件载体,它可以每秒处理 16 亿机器语言指令,PC 机上的 Code Composer Studio 数字仿真软件通过 USB 仿真器与数字电路进行数据交互.

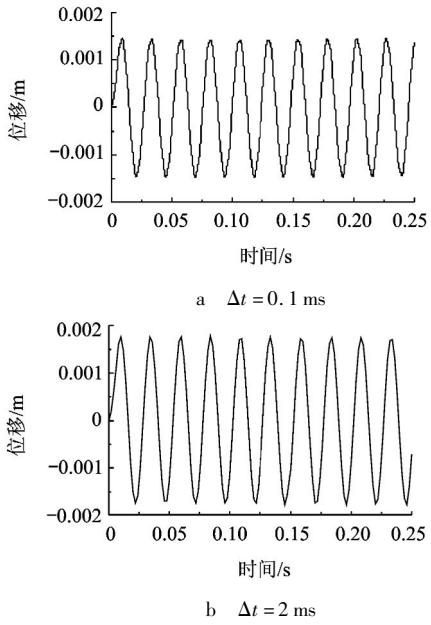
对于完全层合布置了厚度为 4×10^{-5} m 的压电薄膜的尺寸参数为 $L\times b\times h=0.1\times0.01\times1.6\times10^{-3}$ m^3 的悬臂梁,所模拟的材料及控制参数采用文献[9]中的数据,相关材料参数如表 1 所示.

表 1　材料参数

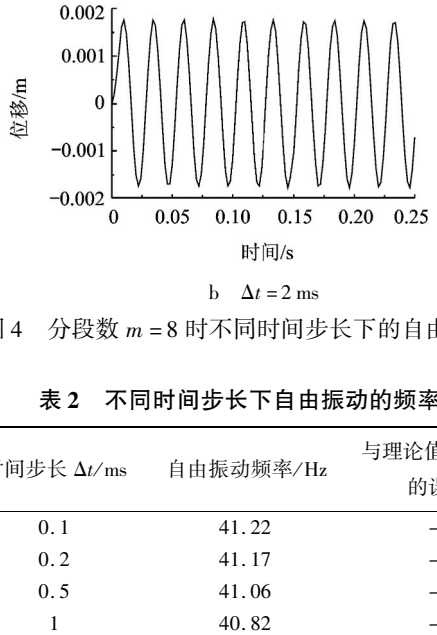
参数	悬臂梁	压电薄膜
ρ/(kg·m^{-3})	1.19×10^3	1.80×10^3
Y/(N·m^{-2})	3.1028×10^9	2.00×10^9
d_{31}/(m·V^{-1})		2.3×10^{-11}
h_{31}/(m·V^{-1})		4.32×10^8

3.1　不同积分时间步长的振动响应分析

先设置差分密度(分段数)为 $m=8$,激励信号为持续时间不足 1/4 个周期的固定值,改变时间步长 Δt,自由振动响应曲线见图 4. 不同时间步长下数字电路模型在自由振动状态下的共振频率与理论值的误差见表 2. 可以看出步长越大时数字电路仿真模型自由振动的频率越小于理论值且误差越来越大. 当 $\Delta t=5$ ms 时,每半个周期约有 4 个采样点,误差明显放大,故分段数为 8 时积分时间步长应不大于 $\Delta t=2$ ms,即响应周期内存在约 20 个以上的采样点能保证结果的精确性.



a　$\Delta t=0.1$ ms



b　$\Delta t=2$ ms

图 4　分段数 $m=8$ 时不同时间步长下的自由振动曲线

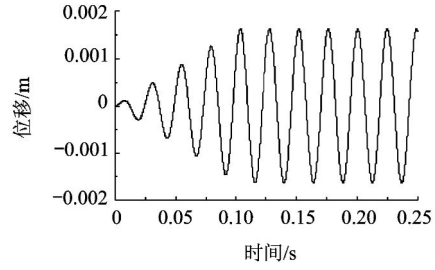
表 2　不同时间步长下自由振动的频率误差

时间步长 Δt/ms	自由振动频率/Hz	与理论值(41.73 Hz)的误差/%
0.1	41.22	−1.22
0.2	41.17	−1.34
0.5	41.06	−1.61
1	40.82	−2.18
2	40.54	−2.85
5	36.36	−12.87

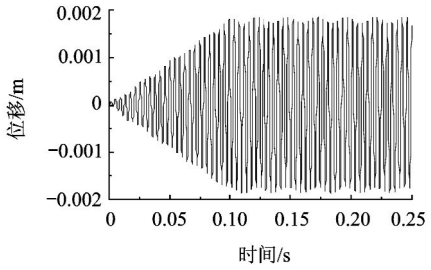
3.2　不同模态及分段数的振动响应分析

为验证数字电路仿真模型的高阶模态特性,采用固定持续时间及幅值的余弦激励信号. 通过改变频率,可以得到各阶模态下的振动响应曲线. 图 5 是仿真模型前 2 阶模态的系统共振波形

($m=8$, $\Delta t=0.1$ ms). 其中图 5b 是 2 阶模态频率余弦激励的共振响应,通过位移响应的峰值变化趋势可以看出,由于模型是从静止位置开始运动,故包含有轻微的一阶模态响应,证明该仿真模型可以同时模拟多个模态的振动特性.



a 第 1 阶



b 第 2 阶

图 5 前 2 阶模态余弦激励时系统的振动曲线

表 3 是在固定步长 $\Delta t=0.1$ ms 下,改变差分的分段数 m,分别取前 2 阶模态的 5 个和 16 个谐振周期的平均振动频率及与理论值的误差.

表 3 前 2 阶模态在不同分段数下的频率误差

分段数 m	1 阶		2 阶	
	自由振动频率/Hz	与理论值(41.73 Hz)相比的误差/%	自由振动频率/Hz	与理论值(261.65 Hz)相比的误差/%
4	39.68	−4.91	207.52	−20.69
8	41.22	−1.22	244.65	−6.50
12	41.49	−0.58	253.16	−3.24
16	41.60	−0.31	256.82	−1.85
20	41.63	−0.24	258.48	−1.21
24	41.70	−0.07	259.32	−0.89

分段数越多,离散的差分模型越接近于实际物理模型,数字仿真模型所得到的模态共振频率也越接近于理论值;在时间步长和分段数一样的情况下,模态阶数越高,数字仿真模型的模态共振频率与理论值的误差也越大;并且随着模态阶数的增加,模态共振频率也增大,相应对时间步长 Δt 的要求也越高,在某一阶模态振动响应的各个周期内应存在约 20 个以上的采样点.

3.3 位移反馈及速度负反馈控制效果分析

为了验证数字电路仿真模型在位移反馈及速度负反馈控制下的控制效果,与文献[9]中的理论值及模拟电路仿真结果进行比较. 选取时间步长 $\Delta t=0.1$ ms 和分段数 $m=24$,施加不同反馈增益,得到的受位移反馈控制后的第 1 阶振动频率及与理论值的误差以及速度负反馈控制下振动波形的阻尼比及与理论值的误差,同时与文献[9]中模拟电路仿真结果进行比较见表 4 和表 5.

表 4 位移反馈控制下的振动频率及误差

反馈增益	频率理论值/Hz	模拟电路		数字电路	
		频率/Hz	误差/%	频率/Hz	误差/%
0	41.73	39.8	−4.64	41.70	−0.07
100	41.67	39.8	−4.49	41.64	−0.07
300	41.54	39.6	−4.67	41.50	−0.10
500	41.38	39.4	−4.78	41.34	−0.10
600	41.34	39.4	−4.70	41.30	−0.10
1 000	41.07	39.1	−4.80	41.02	−0.12

表 5 速度负反馈控制下振动信号阻尼比及误差

反馈增益	阻尼比理论值/Hz	模拟电路		数字电路	
		阻尼比/Hz	误差/%	阻尼比/Hz	误差/%
0	0	0	0	0	0
100	0.331	0.285	−13.84	0.328	−0.91
200	0.181	0.146	−19.45	0.179	−1.10
300	0.118	0.092	−22.37	0.115	−2.54
500	0.070	0.081	16.14	0.068	−2.86
1 000	0.036	0.029	−19.58	0.035	−2.94

可以看出,位移反馈控制使系统的自由振动频率随着反馈增益的增加而降低;增大速度负反馈控制的反馈增益,受控的振动波形阻尼比先是逐渐加大到某一个极值后再缓慢降低. 数字电路仿真模型比采用模拟电路元件的仿真方法具有更高的精确度,更接近文献[9]中的理论值.

4 结 论

本文针对压电悬臂梁结构系统的模态振动控制问题,提出了一种专用的智能元仿真建模方法,在 DSP 数字电路模型中验证了其可行性.

1) 智能元数字电路模型具有可差分密度高、误差小、成本低、抗干扰性高、寿命长、改变模型参数简便等特点,能有效克服有限元仿真模型对智能结构系统分析时间过长及模拟电路仿真精度低、难于建立复杂模型的缺点.

2) 智能元仿真模型的时间积分步长应选择小于模型振动周期的 1/20 才能保证仿真的精确性. 而随着差分密度的增大,仿真模型的振动响应越接近理论结果.

3) 智能元仿真模型在位移和速度反馈控制下的模态控制频率及阻尼比与理论值的误差远低于模拟电路模型的结果,为研究复杂结构的模态振动控制仿真分析提供了一种新的途径.

(下转第 1095 页)

时建立起综合考虑任务和相关功能系统质量特性影响的更为精确的系统效能模型.

2）根据通过该方法建立起的装备总体系统效能的模型,可以分析确定影响装备系统效能的关键质量特性参数.

参考文献（References）

[1] 胡关勃. 质量与可靠性技术在产品研制中的应用研究[D]. 天津:天津工业大学管理学院,2008
Hu Guanbo. Technology application research on quality and reliability for products development and production [D]. Tianjin: School of Management, Tianjin Polytechnic University, 2008 (in Chinese)

[2] 李巧莉,郭齐胜,李亮,等. 基于 STT/QFD 的武器装备需求分析方法研究[J]. 装备指挥技术学院学报,2008,19(4):17 – 19
Li Qiaoli, Guo Qisheng, Li Liang, et al. Analyzing method on equipment requirements based on STT/QFD [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2008, 19(4): 17 – 19 (in Chinese)

[3] 苗宇涛. 质量功能展开的数学模型及其应用研究[D]. 西安:西北工业大学理学院,2006
Miao Yutao. Study on mathematic model and application of quality function deployment [D]. Xi'an: School of Natural and Applied Sciences, Northwestern Polytechnic University, 2006 (in Chinese)

[4] Wasserman G S. On how to prioritize design requirements during the QFD planning process [J]. IIE Transactions, 1993, 25(3): 59 – 63

[5] Tang Jiafu, Fung Richard Y K, Xu Baodong, et al. A new approach to quality function deployment planning with financial consideration [J]. Computer & Operation Research, 2002, 29(11): 1447 – 1462

[6] 刘鸿恩,张列平. 质量功能展开(QFD)理论方法-研究进展综述[J]. 系统工程,2000,18(2):1 – 6
Liu Hongen, Zhang Lieping. Quality function deployment theories and methods review on research progress [J]. System Engineering, 2000, 18(2): 1 – 6 (in Chinese)

(编　辑:娄　嘉)

(上接第 1074 页)

参考文献（References）

[1] Tzou H S, Ding J H. Distributed modal voltages of nonlinear paraboloidal shells with distributed neurons[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2004, 126: 47 – 53

[2] Yue H H, Deng Z Q, Tzou H S. Distributed signal analysis of free-floating paraboloidal membrane shells[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 304: 625 – 639

[3] Dehaven J G, Han Y, Tzou H S. Transition of membrane/ bending neural signals on transforming adaptive shells[J]. Journal of Vibration and Control, 2007, 13(7): 1007 – 1029

[4] Tzou H S, Fu H Q. A study of segmentation of distributed piezoelectric sensors and actuators, part 1: theoretical analysis [J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 172(2): 247 – 259

[5] Tzou H S, Fu H Q. A study of segmentation of distributed piezoelectric sensors and actuators, part 2: parametric study and active vibration controls [J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 172(2): 261 – 275

[6] Xu S X, Koko T S. Finite element analysis and design of actively controlled piezoelectric smart structures[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2004, 40: 241 – 262

[7] Huang D, Sun B H. Approximate solution an smart composite beams by using MATLAB[J]. Composite Structures, 2001, 54: 197 – 205

[8] Alessandroni S, Isola F, Porfiri M. A revival of electric analogs for vibrating mechanical systems aimed to their efficient control by PZT actuators[J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39: 5295 – 5324

[9] Tzou H S, Ding J H, Smithmaitrie P. Electric circuit design and testing of integrated distributed structronic systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 257: 931 – 943

[10] Tzou H S, Chai W K. Design and testing of a hybrid polymeric elcetrostritive/piezoelectric beam with bang-bang control[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21: 417 – 429

[11] Tzou H S. Piezoelectric shells: distributed sensing and control of continua [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993: 115 – 147

[12] Lenning L G, Shah A, Bibyk S B. Integration of VLSI circuits and mechanics for vibration control of flexible structures[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1997, 2(1): 30 – 40

(编　辑:文丽芳)