

压电智能材料在悬臂梁结构振动控制中的应用

艾亿谋 杜成斌 于国军

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:研究压电材料在柔性悬臂梁结构振动控制中的应用,采用压电有限元方法对压电智能梁的响应进行了数值模拟,在考虑压电片与悬臂梁之间相互耦合作用的基础上,通过有限元软件 ABAQUS 数值模拟获得压电智能梁在简谐荷载下的响应,并与有关试验结果进行对比来修正压电应变常数及介电常数等参数.通过数值算例对地震荷载作用下压电梁的振动响应进行了数值模拟,结果表明,压电材料对柔性结构的振动控制效果显著,最大控制效率能达到 45% 左右.

关键词:压电智能材料;结构振动控制;悬臂梁;地震响应

中图分类号: TU323.3; TP212.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-198X(2007)06-0695-04

地震和强风的作用严重威胁土木工程结构的安全.随着结构控制科学、信息技术和材料科学的发展,科学家和工程师们从对自然界和生物进化的学习与思考中得到启示,提出了力图从根本上提高工程结构整个寿命期间安全性及减小灾害影响的一条崭新的思路,即引入了智能结构系统的概念.压电材料是众多智能材料中运用得较为广泛的一种,利用压电智能材料的正、逆压电效应,即压电材料在外加电场作用下引起变形与压电材料在变形下引起电场改变的特性,将压电材料膜片黏附在结构表面或嵌入结构内部作为感应器和驱动器来观测变形与实施变形控制,与外界控制电路一起达到抑制外界干扰的目的.

1 压电智能材料的工作原理及本构方程

1.1 压电材料简介

压电材料在一定温度环境中被电场极化后,材料中的晶体以电场极化方向的晶粒为主,但部分晶粒仍然偏离电场极化方向,从而存在剩余极化强度,并以偶极矩的形式表现出来.当对压电材料施加机械变形时,剩余极化强度将因材料的变形而发生变形,引起材料内部正负电荷中心相对移动产生电极化,从而导致材料 2 个表面上出现符号相反的束缚电荷,电荷密度与外力成正比,这种现象称为正压电效应.正压电效应反映了压电材料具有将机械能转化为电能的能力.检测出压电元件上电荷的变化,即可得知压电元件处的变形量,利用压电材料的正压电效应,可将其制成结构振动控制或结构健康监测中的智能传感器.与此相反,当在压电材料上接通电流,所有晶粒极化方向趋于电场方向,造成压电元件内部正负电荷中心的相对位移,导致压电材料的变形,这种现象称为逆压电效应.逆压电效应反映了压电材料具有将电能转化为机械能的能力.利用压电材料的逆压电效应,可将其制成结构振动控制中的智能驱动器.

压电材料在工程上的应用非常广泛,可用来进行结构振动控制、结构健康监控、威胁预警、智能机翼以及噪声控制等等.在土木工程中,可用来进行结构健康监测与诊断、结构灾害反应控制以及结构损伤智能修复等等.

1.2 压电材料的本构方程

压电材料力电耦合的本构方程反映了压电材料将电能与机械能进行互相转换时数学上量的关系.在结构振动控制中得到运用的智能型压电传感器、压电驱动器和压电耗能阻尼器的机理即是运用了压电材料的力电耦合特性,其本构关系的表达式^[1]为

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = c_{ijkl} - e_{kij}E_k \\ D_i = e_{ikl}\epsilon_{kl} + \lambda_{ik}E_k \end{cases} \tag{1}$$

式中： σ_{ij} ——应力张量； ϵ_{kl} ——应变张量； E_k ——电场强度； D_i ——电位移； c_{ijkl} ——弹性常数张量； e_{kij} ——压电应力常数张量； λ_{ik} ——介电常数张量。

1.3 压电驱动原理

对于压电驱动器来说,是利用压电材料的逆压电效应,即向压电材料输入电压或电荷后产生力的作用.对于梁来说主要是考虑沿长度方向的应力,简化了的逆压电方程^[2]为

$$\sigma_{pe} = \frac{E_{pe} d_{31} V_{pe}(t)}{\delta_{pe}} \tag{2}$$

式中： σ_{pe} ——压电片沿梁 x 方向的应力； E_{pe} 、 d_{31} 、 δ_{pe} ——压电片的弹性模量、压电常数和厚度； $V_{pe}(t)$ ——所施加的电压。

贴于梁表面的压电片产生的应力以剪切力的方式传递给梁,它对梁的作用可以在压电片两端点处的梁截面中点处等效为一对平衡力和一对平衡力偶.单面粘贴压电驱动器时,等效力偶如图 1 所示.力偶表达式^[3]为

$$M(x,t) = KV_{pe}(t)[H(x-x_1) - H(x-x_2)] \tag{3}$$

$$K = \frac{6(1+T)(E_{pe}I_{pe} + E_bI_b)d_{31}}{t_{pe}t_b(4+\psi+6T+4T^2+\frac{T^2}{8})} \tag{4}$$

其中

$$T = \frac{\delta_{pe}}{\delta_b} \qquad \psi = \frac{E_b\delta_b}{E_{pe}\delta_{pe}}$$

式中： δ_{pe} 、 δ_b ——压电片与梁的厚度； $H(x)$ ——Heaviside 阶跃函数； E_{pe} 、 E_b ——压电片与梁的弹性模量； I_{pe} 、 I_b ——压电片与梁的惯性矩； x_1 、 x_2 ——压电片两端的横坐标。

2 计算模型及有关参数

2.1 几何模型及数值算例材料参数

钢梁长 306 mm,宽 27 mm,厚度为 0.9 mm,根据试验结果反推弹性模量为 190 GPa,泊松比为 0.30,密度为 7850 kg/m³.压电片为 PZT-5H 压电陶瓷材料,长 45 mm,宽 10 mm,厚 1 mm,其弹性模量为 63 GPa,泊松比为 0.30,密度为 7500 kg/m³.在该模拟计算中采用的是 PZT-5H 压电陶瓷材料,下面分别给出压电应变常数矩阵 e 和介电常数矩阵 λ ^[4]:

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 741 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 741 \\ -274 & -274 & 593 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{-12} \qquad \lambda = \begin{bmatrix} 1.505 & 0 & 0 \\ 0 & 1.505 & 0 \\ 0 & 0 & 1.301 \end{bmatrix} \times 10^{-8}$$

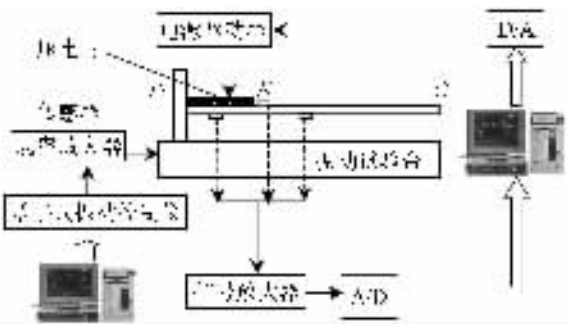


图 2 悬臂梁振动主动控制试验系统
Fig.2 Test system of active vibration control of a cantilever beam

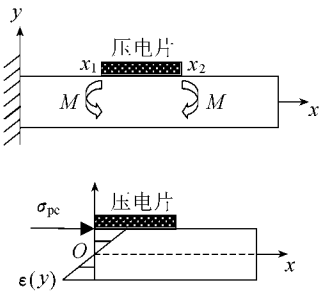


图 1 压电驱动器与悬臂梁的驱动模型
Fig.1 Piezoelectric driver and driving model for flexible cantilever beam

2.2 简谐荷载下悬臂梁的仿真分析

由于实验室的振动台只能进行简谐振动,为与试验相比较,这里以正弦荷载为例进行仿真分析.模拟计算分 2 步进行,首先在零电压的情况下给固定端处施加一个幅值为 100 N 的正弦作用力来分析梁的变形情况,然后在压电片上施加指定的电压来控制梁的变形(电压施加的方法在后面说明),最后将 2 种情况的结果进行对比分析.图 2 所示为带有压电片的悬臂梁振动主动控制试验系统。

通过 ABAQUS 模拟计算出该悬臂梁的前 3 阶频率见表 1,并且与扫频试验获得的频率进行比较,结果很接近.因梁的应变与曲率成正比,且压电片通过产生应变来

抑制梁的振动,故压电片的放置应避免梁曲率为零的位置,放在曲率较大处.由悬臂梁前 3 阶振动模态的振型、应变曲线可知压电片较理想的粘贴位置应在梁的根部.

通过引入压电材料的力-电耦合效应,建立了一种动态三维压电层合梁有限元格式^[5].模拟计算中对压电片采用 ABAQUS^[6-7]中的 C3D8E 压电单元进行网格剖分,对主梁采用 C3D8R 实体单元进行网格剖分.网格形式如图 3(阴影部分为压电单元)所示.

分别在前 3 阶共振频率下对该梁进行压电控制,数值模拟测点 N 加速度振幅的变化与试验结果的对比见表 2.从表 2 可以看出数值模拟计算结果与试验所得规律基本一致,但数值模拟计算的结果和试验结果还存在一定的差距.为此,对模型参数进行了敏感性分析.

2.3 压电材料参数的修正

通过对压电材料参数的敏感性分析,得到修正后压电应变常数矩阵 e 和介电常数矩阵 λ ,以及材料弹性模量:

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 700 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 700 \\ -300 & -300 & 650 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{-12}$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} 1.505 & 0 & 0 \\ 0 & 1.505 & 0 \\ 0 & 0 & 1.505 \end{bmatrix} \times 10^{-8}$$

压电材料的弹性模量为 60 GPa,悬臂梁的弹性模量为 250 GPa.

依据修正后的参数进行数值模拟计算的结果见表 2,可以看出经过修正数值模拟参数以后,数值模拟压电控制的效率有所提高,与试验所得数据更加接近.

3 压电智能梁的时程响应分析

本次模拟计算采用的地震荷载数据来自 Koyuna 地震^[8],根据数值算例悬臂梁的特点采样间隔取为 0.005 s.在模拟计算中只考虑水平方向的地震荷载,加速度时程曲线如图 4 所示.模型参数采用修正后的数据.

整个分析过程是在固定端(D 点处)施加如图 4 所示的地震荷载,然后由 ABAQUS 分析出压电片两端的力矩与时间的关系,在分析过程中只要减小压电片两端的力矩就可以达到控制梁变形的目的,由式(3)可知,可利用压电片的逆压电效应,对压电片施加适当的电压来达到振动控制的效果.本次模拟计算利用有限元软件获得了压电片两端弯矩大小随时间变化的关系,由式(3)和式(4)可知力矩 M 与施加的电压成正比,由式(4)计算得比例系数 $K = 1/3$,然后绘出施加控制电压时程曲线,见图 5.

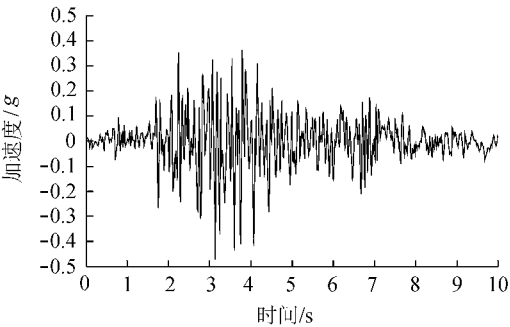


图 4 加速度时程曲线

Fig.4 Time-history curve of acceleration

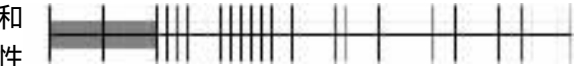


图 3 悬臂梁网格示意图

Fig.3 FEM meshes of a cantilever beam

表 2 共振频率下测点 N 有无压电控制的加速度峰值

Table 2 Peak acceleration at observation point N under resonant frequency with or without piezoelectric control m/s²

激振频率	数值模拟		试验结果	
	无压电控制	有压电控制	无压电控制	有压电控制
1 阶	86.33(95.26)	70.98(78.20)	96.22	79.56
2 阶	- 88.78(- 92.78)	- 75.11(- 78.44)	- 93.48	- 80.30
3 阶	- 143.34(- 148.37)	- 115.40(- 119.39)	- 150.66	- 118.98

注 括号中数据为依据修正后的参数进行数值模拟计算的加速度峰值.

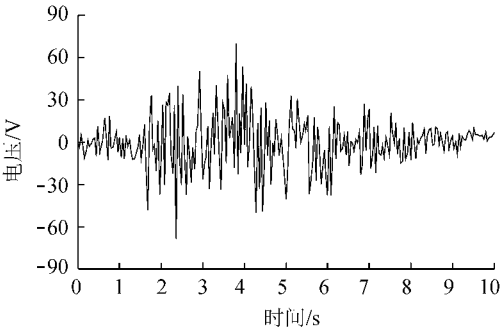


图 5 控制电压时程曲线

Fig.5 Time-history curve of control voltage

最后得出自由端 C 点的位移响应,见图 6.分别对未施加压电控制和施加压电控制的 C 点位移响应进行比较分析,获得较好的压电控制效果.在 10 s 地震荷载作用中,分别对比了 5 个时间点的位移幅值,发现幅值

都有所减小,说明压电控制方式对结构在地震荷载作用下的响应起到了较好的控制作用.

表3给出了所取5个时间点在施加压电控制前后C点位移幅值的对比.分析时间点都是取(未控制中)较大的峰值点.从图6和表3均可看出在施加压电控制以后C点的幅值减小了,压电片在该结构震动控制中起到了很好的作用.最大的控制效率点在 t_4 处,控制率达到45.27%.

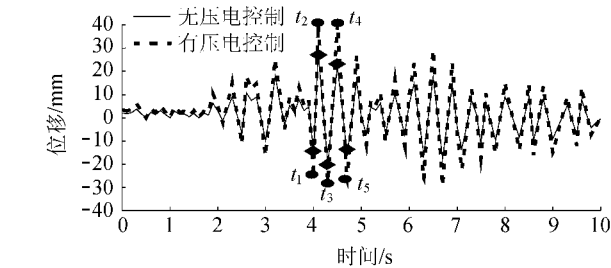


图6 压电控制前后C点的时间-位移(对地位移)曲线

Fig.6 Time-displacement curves for point C before and after piezoelectric control

表3 压电控制前后C点的位移值
Table 3 Comparison of displacement at point C before and after piezoelectric control

时间点	时间/s	C点位移值/mm	
		无压电控制	有压电控制
t_1	4.0	-25.0	-16.2
t_2	4.1	40.8	28.0
t_3	4.3	-27.5	-20.0
t_4	4.5	40.2	22.0
t_5	4.7	-27.0	-15.0

4 结 论

a. 将压电材料耦合进有限元之中进行仿真计算是可行的,本文的有关数据仿真结果与试验结果一致证实了这一点.

b. 压电材料对柔性结构的振动控制效果显著,本文数值算例中只需加0~150V范围内的电压即可实现对压电悬臂梁结构的振动控制.

参考文献:

[1]SUNG YI,SHI FU-LING,MING YING. Large deformation finite element analyses of composite structures integrated with piezoelectric sensors and actuators[J]. Finite Elements in Analysis and Design 2000,35(1):1-15.

[2]李书进,翟伟廉,王军武.压电材料智能控制器对框架结构地震反应的主动控制[J].地震工程与工程振动,2000,20(1):100-104.

[3]秦荣.智能结构力学[M].北京:科学出版社,2005:20-100.

[4]CRAWLEY E F,LUIS J. Use Piezoelectric actuator as elements of intelligent structures[T]. AIAA Journal,1987,25(10):1375-1385.

[5]王社良,苏三庆.压电类智能结构的力学特性及其工程应用[M].北京:北京工业建筑出版社,2000:35-106.

[6]石亦平,周玉蓉.ABAQUS有限元分析实例详解[M].北京:机械工业出版社,2006:303-343.

[7]庄茁,张帆,岑松.ABAQUS非线性有限元分析与实例[M].北京:科学出版社,2005:50-109.

[8]CHOPRA A K,CHAKRABARTI P. The Koyna earthquake and the damage to Koyna dam[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,1973,63(2):381-397.

Vibration control of cantilever beams with piezoelectric intelligent materials

AI Yi-mou , DU Cheng-bin , YU Guo-jun
(College of Civil Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract: In consideration of the coupling effect between piezoelectric patches and flexible cantilever beams , the response of the piezoelectric intelligent beam under harmonic loads was obtained by numerical simulation with the software ABAQUS. By comparison with test data , the parameters , including the piezoelectric strain constant and the dielectric constant , were modified. Case study on numerical simulation of vibration response of piezoelectric beams subjected to a seismic load shows that the piezoelectric materials are of evident effects on vibration control of flexible structures , and the maximum control efficiency can reach 45% or so.

Key words : piezoelectric intelligent material ; structural vibration control ; cantilever beam ; seismic response