

文章编号:1673-9469(2008)03-0038-04

智能结构中致动器位置和尺寸的优化研究

袁伟泽, 高端贞, 曹丽雅, 张京军

(河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要:在研究智能结构振动主动控制致动器的位置和尺寸优化问题中,首先推导了多压电片传感方程、致动方程和结构的动能、势能表达式,并结合模态的可控性、可观性以及模态价值构建致动器位置尺寸优化准则;然后结合智能简支梁实例计算出其粘贴压电致动器的最优位置和尺寸,并通过编写 APDL(ansys parameter design language)程序对粘贴有压电材料的智能简支梁结构进行瞬态动力学分析,实现对智能梁的振动控制仿真。

关键词:智能结构;模态价值;优化准则;APDL 程序

中图分类号: TH113.1

文献标识码: A

Study on the piezoelectric actuator's optimal location and size of smart structure and simulated

YUAN Wei-ze, GAO Rui-zhen, CAO Li-ya, ZHANG Jing-jun

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: In this paper, we discuss the problem of obtaining the piezoelectric actuator's optimal location and size on the smart structure. At first, the expressions of multi piezoelectric sensor and actuator equation and the expression of kinetic and potential energy were expressed, then construct the optimal rule of piezoelectric actuator's location and size according to the modal controllability and observability and the modal cost. Finally, we use a simply-supported beam to calculate the optimal location and size and establish finite element model of the beam with piezoelectric materials by ANSYS software. The vibration control of structure has become true through compiling the APDL(ansys parameter design language) program and using transient dynamic analysis.

Key words: smart structure; modal cost; optimal rule; program of APDL

智能结构是一种新的结构,具有感知、智能逻辑判断和响应内外环境变化的能力,可实现结构的自检、自诊断、自适应^[1],它在航空、航天、潜艇、建筑结构等方面呈现出良好的应用前景^[2]。对于智能结构振动主动控制来说,其核心部分是通过致动器的压电效应来控制结构振动。影响结构控制效果的因素有两类:一类是致动器的位置和尺寸;一类是致动器的数量。本文就智能结构中致动器的位置和尺寸问题进行了研究和探讨。

1 系统模型与理论

1.1 简支梁模型

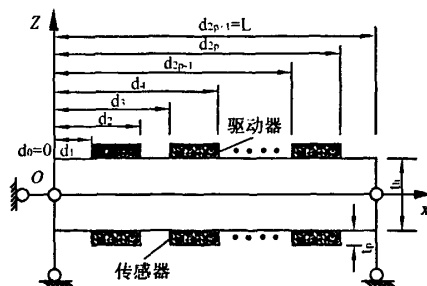


图1 多压电片简支梁的传感致动模型

Fig.1 Simply-supported beam with a number of collocated piezoelectric patches

收稿日期:2008-04-30

基金项目:河北省自然科学基金项目(E2008000731) 河北省教育厅科学研究计划项目(2006107)

特约专稿

作者简介:袁伟泽(1981-),男,河北保定人,硕士研究生,从事结构振动主动控制方面的研究。

图1所示为粘贴了 p 对压电片的简支梁的传感/致动模型。设梁长为 L , 宽为 b , 厚度为 t_h , 每一对压电片对称地粘贴在简支梁的上下表面, 且每对压电片的厚度为 t_p , 宽度与梁相同。第 p 对压电片左右两端距简支梁左端的距离分别为 d_{2p-1} 和 d_{2p} 。假设压电片与简支梁粘贴良好, 并忽略压电片的粘附层对简支梁振动特性的影响。

在讨论简支弹性梁的压电传感和致动方程时, 我们可以根据固有振型展开定理, 将梁的振动挠度 w 用它的固有振型 $\{\Phi_i(x)\}$ 的线性组合表示:

$$w(t, x) = \sum_{i=1}^n \Phi_i(x) q_i(t) \quad (1)$$

式中 $q_i(t)$ 表示广义坐标。

1.2 多压电片传感方程

由压电材料的线性本构关系, 第 p 对压电传感器上的电压 U_{sp} 为

$$U_{sp} = \sum_{i=1}^n K_i [\Phi'_i(d_{2p}) - \Phi'_i(d_{2p-1})] \quad (2)$$

式中 $K_i = \frac{bt_h d_{31} E_p}{2C}$; b - 量宽; t_h - 梁厚; d_{31} - 压电应力系数; E_p - 压电片弹性模量; C - 压电片电容; i - 第 i 阶模态。

1.3 多压电片压电致动方程

压电致动器在控制电路输入电压时会对简支梁产生力矩作用, 在 m 个压电致动器的共同作用下, 简支梁受到的总力矩为

$$M(x, t) = \sum_{p=1}^m K_a v_{sp} [h(x - x_{2p-1}) - h(x - x_{2p})] \quad (3)$$

式中 $h(x)$ - Heaviside 阶跃函数; v_a - 输入电压且随时间变化; K_a - 压电耦合系数, 且 $K_a = \frac{1}{2} b d_{31} E_p (t_h + t_p)$ 。

1.4 梁的动能和势能

由欧拉 - 伯努利梁模型知梁的动能为

$$2T = \sum_{k=1}^{p+1} (b\rho_k t_h) \int_{d_{2k-2}}^{d_{2k-1}} \left(\frac{\partial w(x, t)}{\partial t} \right)^2 dx + \sum_{k=1}^p (b\rho_k t_h + 2b\rho_p t_p) \int_{d_{2k-1}}^{d_{2k}} \left(\frac{\partial w(x, t)}{\partial t} \right)^2 dx \quad (4)$$

梁的势能为

$$2U = \sum_{k=1}^{p+1} \left(\frac{bt_h^3 E_h}{12} \right) \int_{d_{2k-2}}^{d_{2k-1}} \left(\frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} \right)^2 dx + \sum_{k=1}^p \int_{d_{2k-1}}^{d_{2k}} \left[(EI)_c \left(\frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} \right)^2 + 2C_p (H(x - d_{2k-1}) - H(x - d_{2k})) v_k \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} \right] dx \quad (5)$$

其中 $C_p = bE_p d_{31} (t_h + t_p)$

$$(EI)_c = \frac{2b}{3} E_p \left[\left(\frac{t_h}{2} + t_p \right)^3 - \left(\frac{t_h}{2} \right)^3 \right] + \frac{bt_h^3}{12} E_h$$

式中 ρ_h - 梁密度; E_h - 梁的弹性模量; ρ_p - 压电片密度; E_p - 压电片的弹性模量。

模型中不存在非保守力, 且只考虑梁自身很小的阻尼, 应用哈密顿原理得

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T - U) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W_{nc} dt = 0 \quad (6)$$

式中 $\delta W_{nc} = - \int_0^L c_x I \left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial t} \right) \left(\frac{\partial^2 (\delta w)}{\partial x^2} \right) dx$, $I = \frac{b}{2} \int x^2 dx$, c_x 为梁的阻尼系数。

将(1)式代入(6)式得

$$M_{ij} \ddot{q}_j + C_{ij} \dot{q}_j + k_{ij} q_j = D_{ik} v_k(t) \quad (7)$$

式中 $i, j = 1 \dots n$, 质量、阻尼、刚度矩阵为

$$M_{ij} = \sum_{k=1}^{p+1} (b\rho_k t_h) \int_{d_{2k-2}}^{d_{2k-1}} \Phi_i \Phi_j dx + \sum_{k=1}^p (b\rho_k t_h + 2b\rho_p t_p) \int_{d_{2k-1}}^{d_{2k}} \Phi_i \Phi_j dx$$

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^{p+1} (c_x I) \int_{d_{2k-2}}^{d_{2k-1}} \Phi'_i \Phi'_j dx + \sum_{k=1}^p (c_x I) \int_{d_{2k-1}}^{d_{2k}} \Phi'_i \Phi'_j dx$$

$$K_{ij} = \sum_{k=1}^{p+1} (EI)_h \int_{d_{2k-1}}^{d_{2k-1}} \Phi'_i \Phi'_j dx + \sum_{k=1}^p (EI)_h \int_{d_{2k-1}}^{d_{2k}} \Phi'_i \Phi'_j dx$$

$$D_{ik} = C_p [\Phi'_i(d_{2k}) - \Phi'_i(d_{2k-1})]$$

对第 i 阶模态的控制影响矩阵为

$$D_{ik} = C_p [\Phi'_i(d_{2k}) - \Phi'_i(d_{2k-1})]$$

2 模态可控性、价值和优化准则

2.1 模态的可控性和可观性

首先我们将(7)式的二阶系统模型转化为一阶系统模型

$$\dot{X} = AX + Bv(t) \quad (8)$$

$$\text{式中 } X = \begin{pmatrix} q \\ \dot{q} \end{pmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}D \end{pmatrix}.$$

我们利用矩阵A标准的左特征向量 R_i 与控制输入影响矩阵B的夹角 θ 表示系统的可控性,第 j 个致动器对第 i 阶模态的可控性为

$$\cos\theta_{ij} = \frac{|R_i^T b_j|}{\|R_i\| \|b_j\|} \quad (9)$$

式中 b_j - 矩阵B的列向量; $\|R_i\|$, $\|b_j\|$ - R_i , b_j 的欧几里德范数。

由式(9)可知当夹角 θ 等于0时,第 j 个致动器对第 i 阶模态的可控效果最好,当夹角为90°时,控制器 j 对模态 i 无作用。那么所有的控制器对第 i 阶模态的控制效果 β_i 我们就可以用 f_i 的欧几里德范数表示:

$$\beta_i = \|f_i\| \quad (10)$$

式中 $f_i^T = [\cos\theta_{i1} \|b_1\|, \dots, \cos\theta_{im} \|b_m\|]$

对于粘贴压电片的梁模型来说,系统的可观性与系统的可控性等效^[3]。

2.2 模态价值

结构在特定的外界激励作用下产生振动现象,结构各阶自振模态相对于结构整体位移的重要性就是各阶模态相对于系统的价值^[4,5]。外界激励的形式很多,这里以结构仅受到单位冲击荷载 u 作用进行说明,此时由(7)式可得

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = D_w u \quad (11)$$

式中 D_w 为扰动影响矩阵;同时为了使问题简化,假设梁的阻尼系数 $c_i = aE$ (a 为大于零的实常数),则阻尼矩阵 $C = aK$ 。

当结构受到作用在 m 个位置上单位冲击荷载向量 u 的作用时,我们引入标准模态矩阵 ϕ 和模态坐标向量 $\eta(t)$ 且 $q(t) = \phi\eta(t)$, 则

$$\tilde{M}\ddot{\eta} + \tilde{C}\dot{\eta} + \tilde{K}\eta = \tilde{D}_w u \quad (12)$$

式中模态坐标质量、扰动、阻尼和刚度矩阵 $\tilde{M} =$

$$\phi^T M \phi = I; \tilde{D}_w = \phi^T D_w; \zeta_i = \frac{a\omega_i}{2}, \tilde{C} = \phi^T C \phi =$$

$$\text{diag}(2\zeta_1\omega_1, 2\zeta_2\omega_2, \dots, 2\zeta_n\omega_n); \tilde{K} = \phi^T K \phi = \text{diag}(\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2).$$

此时结构的性能表现可用函数表示:

$$V = \sum_1^m \int_0^{\infty} \gamma_d^T(t) Q_v \gamma_d(t) dt \quad (13)$$

式中

$$\gamma_d(t) = \begin{bmatrix} C_{dx} & 0 \\ 0 & C_{dx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} C_{dx}\phi & 0 \\ 0 & C_{dx}\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta(t) \\ \dot{\eta}(t) \end{bmatrix};$$

Q_v 为权重矩阵; C_{dx} 和 C_{dx} 为输出影响矩阵,同时它们可以人为选定,例如当 $C_{dx} = C_{dx} = \phi^T$ 且 $Q_v = \begin{bmatrix} \text{diag}(\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2) & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}$ 时, (13) 式中 V 就表示

系统的动能和势能的和。

第 I 阶模态对整个结构的影响主要体现在位移 V_{η} 和速度 $V_{\dot{\eta}}$ 两个方面:

$$V_i = V_{\eta} + V_{\dot{\eta}} = [X_{\eta}^T \phi^T C_{dx}^T Q_x C_{dx} \phi]_{\eta} + [X_{\dot{\eta}}^T \phi^T C_{dx}^T Q_x C_{dx} \phi]_{\dot{\eta}} \quad (14)$$

$$\text{式中 } \begin{bmatrix} Q_x & 0 \\ 0 & Q_x \end{bmatrix} = Q_v,$$

$$[x_{\eta}]_{\eta} = \frac{2(\zeta_i\omega_i + \zeta_j\omega_j)}{\Delta} [\tilde{D}_w^T \tilde{D}_w]_{\eta},$$

$$[x_{\dot{\eta}}]_{\dot{\eta}} = \frac{2\omega_i\omega_j(\zeta_i\omega_i + \zeta_j\omega_j)}{\Delta} [\tilde{D}_w^T \tilde{D}_w]_{\dot{\eta}},$$

$$\Delta = 4\omega_i\omega_j(\zeta_i\omega_i + \zeta_j\omega_j)(\zeta_i\omega_j + \zeta_j\omega_i) + (\omega_i^2 - \omega_j^2)^2.$$

经过以上分析可知,当结构受到作用在 m 个位置上单位冲击荷载向量 u 时,整个结构的性能为 V ,第 i 阶模态对整个结构的影响为 V_i 。

2.3 优化准则

决定压电片的位置 d_k 和尺寸 $(d_{2k} - d_{2k-1})$ ($k = 1, 2, \dots, 2p$) 的准则应是最大可能的控制结构的所有自振模态 n , 其数学表达式为

$$\begin{aligned} \text{Max obj} &= \sum_{i=1}^n \frac{V_i \beta_i}{V} - \sum_{k=1}^p \left(\frac{d_{2k} - d_{2k-1}}{\gamma L} \right) \\ \text{St} &\begin{cases} d_k - d_{k-1} < 0 \\ d_{2p} - L < 0 \\ d_1, d_2, \dots, d_{2p+1} > 0 \end{cases} \quad (15) \end{aligned}$$

式中 L , d_k - 梁的长度和距梁左端支座的距离; γ - 比例因子且 $0 < \gamma < 1$ 。

3 ANSYS 平台上的结构振动控制仿真

在实际中我们发现控制结构的全部模态是不科学的也是不可能的,然而在结构的振动中起主要作用的是前几阶模态,所以我们控制的也就是起主要作用的前几阶模态。同时 Q_i 、 C_{di} 和 C_{di} 人为选定,使 V 表示系统总的能量, V_i 表示第 i 阶模态的能量。

3.1 模型简介

简支梁与压电材料同宽,具体尺寸:梁长 $L = 500\text{mm}$,梁宽 $b = 5\text{mm}$,梁厚 $t_h = 1\text{mm}$;压电片厚 $t_p = 0.1\text{mm}$,阻尼比 $\zeta = 0.001$ 。梁的材质为铝材,所选有限元单元为 SOLID45,密度为 2843kg/m^3 ,弹性模量为 $7.5842 \times 10^{10}\text{N/m}^2$,泊松比为 0.27。其他参数见表 1。

表 1 压电材料属性

Tab.1 Property of piezoelectric

PZT-5H	密度 (kg/m^3)	相对介电常数		柔度系数(10^{10}N/m^2)		
		$\epsilon_{11}^s/\epsilon_0$	$\epsilon_{33}^s/\epsilon_0$	c_{11}	c_{12}	c_{13}
SOLID5	7500	1697.53	1468.26	12.6	7.95	8.41

本文拟采用结构前五阶模态近似表示结构的振动情况 $\{\phi_i(x) (i = 1, \dots, 5)\}$,用两个致动器对结构进行控制。荷载为单位冲击荷载,作用位置为距梁左端支座 150mm, $\gamma = 0.25$ 。经计算前五阶模态的 V_i 可知各阶所占比重依次为 0.72, 0.22, 0.01, 0.02, 0.03; $d_1 = 60\text{mm}$, $d_2 = 150$, $d_3 = 150$, $d_4 = 450$ 。

3.2 ANSYS 仿真

通过编写 APDL (ansys parameter design language) 程序对粘贴有压电片的简支梁进行瞬态动力学分析^[6,7]。部分命令流如下:

```

n,1                ! 建模
n,51,0.5
egen,50,1,-1      ! 建立梁单元
e,p+k,p+1+k,51+p+1+k,51+p+k,712+p+k,712+p+1+k,712+p+51+1+k,712+p+51+k
! 建立压电单元
瞬态分析闭环控制命令流:
time,dt           ! 定义时间步长
f,66,fz,1        ! 施加冲击荷载

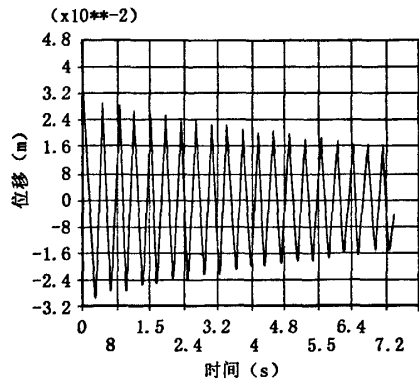
```

```

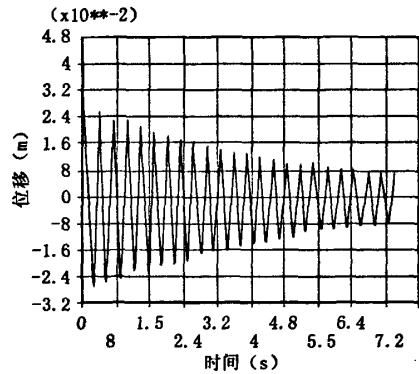
* do,t,2*dt,ts,dt  ! 定义循环分析
val = kc * pro * st1 ! 计算驱动器上电压
d,ntop11,volt,val ! 施加电压
/post26           ! 进入后处理
nsol,3,76,u,z    ! 选择中点位移
/axlab,x,time(s) ! 定义坐标轴
plvar,3          ! 显示位移曲线

```

控制前后的简支梁上中点的位移随时间变化曲线见图 2。



a) 未施加控制



b) 施加控制

图 2 梁上中点的位移曲线

Fig.2 The displacement at the center of beam

通过给简支梁施加一个冲击荷载,对比施加荷载前后梁中点振动的位移曲线,可以看出控制后中点位移衰减很快,达到了控制的目的。

4 结束语

应用 ansys 软件的仿真功能对算例进行建模和瞬态分析可以看出,应用该优化准则计算得到最优位置和尺寸的致动器能够有效的抑制智能梁的振动,最终达到了对其整体进行控制的目的。(下转第 45 页)

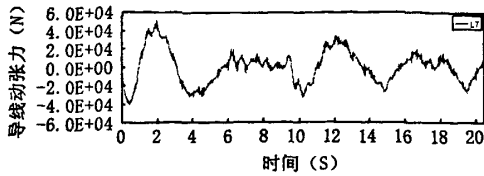


图8 导线动张力时程

Fig.8 Time of dynamic tension of lead wire

3 结束语

以台风“麦莎”作用下某输电塔结构为工程背景,反演给出了输电塔在台风作用下的风荷载分布和导线的动张力时程,证实了基于缩聚串联多自由度模型的荷载反演方法的工程实用性,为进一步研究输电塔的风荷载提供了一个有力的工具。

(上接 25 页) m 值的大小对峰值后的脆性有影响, m 值越大,脆性越强, m 值越小,延性越强; F_0 值的大小对峰值应力有影响, F_0 值越大,峰值应力越大,岩石强度越高。

参考文献:

- [1] 曹文贵,方祖烈,唐学军. 岩石损伤软化统计本构模型之研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 628 - 633.
- [2] 曹文贵,张升. 基于 Mohr - Coulomb 准则的岩石损伤统计分析方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2005, 32(1): 44 - 47.
- [3] 李杭州,廖红建,盛谦. 基于统一强度理论的软岩损伤

(上接第 41 页)

参考文献:

- [1] GARBA J A, FANSON J L. Adaptive structures for precision controlled large space systems[J]. Journal of Intel Mater Syst Strut, 1992, 3(2): 348 - 366.
- [2] HAFTKA R T, ADELMAN H M. Selection of actuator locations for static shape control of large space structures by heuristic integer programming [J]. Computers & Structures, 1985, 20: 575 - 582.
- [3] KIM Y, JUNKINS J L. Measure of controllability for actuator placement [J]. Journal of Guidance Control, and Dynamics, 1991, 14(5): 895 - 902.

参考文献:

- [1] 李杰. 生命线工程抗震 - 基础理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] 谢强,李杰. 电力系统自然灾害的现状与对策[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(4): 126 - 131.
- [3] 谢强,张勇,李杰. 华东 500kV 以上 5237 线输电线路风致倒塔事故的调查分析[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 59 - 63.
- [4] 敖翔. 空间框架结构时域参数识别与荷载反演研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.
- [5] 何涛,谢强,赵昕,等. 高压输电塔结构风荷载反演与导线动张力反演研究[R]. 同济大学生命线工程研究所, 上海: 同济大学, 2005.

(责任编辑 刘存英)

伤统计本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1331 - 1336.

- [4] 俞茂宏. 双剪理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [5] 廖华林. 基于 Mohr - Coulomb 准则的岩石损伤统计本构模型[J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(6): 85 - 87.
- [6] 刘成学, 杨林德, 曹文贵. 岩石统计损伤软化本构模型及其参数反演[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(3): 453 - 457.
- [7] 杨明辉, 赵明华, 曹文贵. 岩石损伤软化统计本构模型参数的确定方法[J]. 水利学报, 2005, 36(3): 345 - 349.
- [8] 耶格 J C, 库克 N G W, 中国科学院工程力学研究所译. 岩石力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1983.

(责任编辑 刘存英)

- [4] JUNKINS J L, KIM Y. Introduction to dynamics and control of flexible structures [M]. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993.
- [5] 徐小胜, 于登云, 曲广吉. 模态价值分析在航天器模型降阶中的应用研究[J]. 中国空间科学技术, 2003, 12(6): 1 - 6.
- [6] 郑骥. ANSYS 在压电智能板振动主动控制中的应用[J]. 河北建筑科技学院学报, 2006, 23(2): 14 - 16.
- [7] 曹丽雅, 高瑞贞, 袁伟泽, 等. 基于能力最小准则确定压电片位置及仿真[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2008, 25(1): 21 - 24.

(责任编辑 闫纯有)

智能结构中致动器位置和尺寸的优化研究

作者: [袁伟泽](#), [高瑞贞](#), [曹丽雅](#), [张京军](#), [YUAN Wei-ze](#), [GAO Rui-zhen](#), [CAO Li-ya](#),
[ZHANG Jing-jun](#)
作者单位: [河北工程大学, 土木工程学院, 河北, 邯郸, 056038](#)
刊名: [河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)
年, 卷(期): 2008, 25 (3)
被引用次数: 1次

参考文献(7条)

1. [GARBA J A;FANSON J L Adaptive structures for precision controlled large space systems](#) 1992(02)
2. [HAFTKA R T;ADELMAN H M Selection of actuator locations for static shape control of large space structures by heuristic integer programming](#) 1985
3. [KIM Y;JUNKINS J L Measure of controllability for actuator placement](#)[外文期刊] 1991(05)
4. [JUNKINS J L;KIM Y Introduction to dynamics and control of flexible structures](#) 1993
5. [徐小胜;于登云;曲广吉 模态价值分析在航天器模型降阶中的应用研究](#)[期刊论文]-[中国空间科学技术](#) 2003(06)
6. [郑骥 ANSYS在压电智能板振动主动控制中的应用](#)[期刊论文]-[河北建筑科技学院学报](#) 2006(02)
7. [曹丽雅;高瑞贞;袁伟泽 基于能力最小准则确定压电片位置及仿真](#)[期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2008(01)

引证文献(1条)

1. [李京涛,何丽丽,高瑞贞,张京军 改进遗传算法在桁架拓扑优化中的应用](#)[期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2009(3)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb200803011.aspx