

面向结构振动控制的压电作动器优化配置研究

王军^{1,*}, 杨亚东¹, 张家应¹, 苏洪波^{1,2}

1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191

2. 海军航空工程学院青岛校区 航空机械系, 山东 青岛 266041

摘要: 为了研究压电主动结构振动控制当中作动器的位置优化问题,从系统的状态空间方程出发,在系统可控性 Gram 矩阵特征值的基础上描述性能指标,以输入的能量吸收率为优化目标函数,提出了一种新的位置优化配置准则。利用有限元分析(FEA)方法分析作动器的配置,并与遗传算法(GA)结合进行优化计算,计算过程中对作动器的位置采用二进制编码加以描述。通过对一压电筒支板结构的仿真计算对该方法进行了验证,并与其他几种不同的配置方法进行对比,从而证明了新方法的优越性。

关键词: 智能结构; 压电作动器; 位置优化; 遗传算法; 有限元分析

中图分类号: V414.3; TU311 文献标识码: A

新一代航天器都带有柔性附件,如太阳帆板、板形天线等,这些柔性结构的刚度小、阻尼小,其振动会影响航天器性能,因此,通过主动振动控制抑制其振动是十分必要的。

柔性结构的主动振动控制的性能与传感器/作动器的种类和配置的位置密切相关,采用非连续的压电片进行振动主动控制时,其位置优化配置是一个重要的问题。Arbel^[1]提出的配置方法是由每个压电片对可选模态的范数组成引导矩阵,并且根据它们在系统范数中的参与量对它们分等级,然后给出配置策略,得到优化位置。Bruant 等^[2-3]提出了利用能量吸收率的方法来实现位置优化配置,求出每个模态的能量与单独控制某阶时该模态所吸收的能量之比,然后对他们进行等级划分,得到优化位置。但是由于文献[1]、文献[2]和文献[4]中均未综合考虑各阶模态的能量

吸收率,因此不能保证得到最高的吸收能量,也就无法得到最优位置。

由于控制能量的利用是控制系统设计的重要依据之一,因此本文在进行压电片位置配置时,以能量的吸收率为评价指标。根据系统压电控制方程的输入输出矩阵,以输入能量和输出能量的最大能量吸收率作为目标,给出了一种压电作动器/传感器的位置优化配置方法。并与 Arbel^[1]和 Bruant 等^[2-3]所研究的压电片配置优化方法作了比较。

1 压电结构的振动主动控制方程

假设柔性结构上作用了 N_a 个压电作动器和 N_s 个压电传感器。利用模态分析和有限元法^[3-6],通过对系统的振动方程和传感器输出方程进行解耦,得到其在模态坐标系下的方程为

收稿日期: 2011-05-23; 退修日期: 2011-06-22; 录用日期: 2011-11-07; 网络出版时间: 2011-12-21 11:28

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20111221.1128.001.html

DOI: CNKI:11-1929/V.20111221.1128.001

基金项目: 唯实青年教师基金(YWF-10-02-014)

* 通讯作者. Tel.: 010-82338215 E-mail: wang_jun@buaa.edu.cn

引用格式: Wang J, Yang Y D, Zhang J Y, et al. Investigation of piezoelectric actuator optimal configuration for structural vibration control. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(3): 494-500. 王军, 杨亚东, 张家应, 等. 面向结构振动控制的压电作动器优化配置研究. 航空学报, 2012, 33(3): 494-500.

根据 Hac 等^[13]提出的理论,对于一个稳定状态的线性系统,可不用求解 $W(T)$,其相应控制模态($i=1, 2, \dots, N$)的 Gram 矩阵分量可写为

$$(\mathbf{W}_c)_{i+N, i+N} = (\mathbf{W}_c^U)_{ii} = \sum_{j=1}^{N_a} \frac{(b_{ij})^2}{4\zeta_i \omega_i} = \frac{1}{4\zeta_i \omega_i} \sum_{j=1}^{N_a} (b_{ij})^2 \quad (12)$$

剩余模态($i=1, 2, \dots, N^R$) Gram 矩阵分量可以写为

$$(\mathbf{W}_c)_{i+2N+N^R, i+2N+N^R} = (\mathbf{W}_c^R)_{ij} = \frac{1}{4\zeta_i \omega_i} \sum_{j=1}^{N_a} (b_{ij}^R)^2 \quad (13)$$

由式(12)和式(13)可知,由于各阶频率不同,故 $W(T)$ 的各个分量不在同一范围。

于是可以得到一种最优化准则:

$$J_{\text{Arbel}} = \max_{\tilde{\gamma}} \left\{ \min_{i=1,2,\dots,N} (\mathbf{W}_c^U(A_1, A_2, \dots, A_{N_a}))_{ii} - \tilde{\gamma} \max_{i=1,2,\dots,N^R} (\mathbf{W}_c^R(A_1, A_2, \dots, A_{N_a}))_{ii} \right\} \quad (14)$$

式中: $\tilde{\gamma}$ 为权重指数; A_i ($i=1, 2, \dots, N_a$) 为第 i 个作动器的位置。Arbel^[1]已经研究了当 $\tilde{\gamma}$ 为零的情况,由于式(14)中 \mathbf{W}_c^U 和 \mathbf{W}_c^R 的各个分量不在同一范围,则只能保证作动器配置在使吸收能量最小的模态最大化处,但无法保证吸收的总能量最大,所以得到的不是位置最优解。

在此基础上, Bruant 等^[2-3]提出了一种目标更加明确的位置优化准则:

$$J_{\text{Bru}} = \max_{\tilde{\gamma}} \left\{ \min_{i=1,2,\dots,N} \frac{(\mathbf{W}_c^U(A_1, A_2, \dots, A_{N_a}))_{ii}}{\max_{A_1, A_2, \dots, A_{N_a}} (\mathbf{W}_c^U(A_1, A_2, \dots, A_{N_a}))_{ii}} - \tilde{\gamma} \max_{i=1,2,\dots,N^R} \frac{(\mathbf{W}_c^R(A_1, A_2, \dots, A_{N_a}))_{ii}}{\max_{A_1, A_2, \dots, A_{N_a}} (\mathbf{W}_c^R(A_1, A_2, \dots, A_{N_a}))_{ii}} \right\} \quad (15)$$

式中: $\max_{A_1, A_2, \dots, A_{N_a}} (\mathbf{W}_c^U(A_1, A_2, \dots, A_{N_a}))_{ii}$ 和 $\max_{A_1, A_2, \dots, A_{N_a}} (\mathbf{W}_c^R(A_1, A_2, \dots, A_{N_a}))_{ii}$ 为采用独立模态控制法控制 i 阶模态时,其所能吸收的最大能量; $(\mathbf{W}_c^U(A_1, A_2, \dots, A_{N_a}))_{ii}$ 和 $(\mathbf{W}_c^R(A_1, A_2, \dots, A_{N_a}))_{ii}$ 为广义独立模态控制 i 阶模态时其所吸收的能量; $(\mathbf{W}_c^U(A_1, A_2, \dots, A_{N_a}))_{ii}/$

$\max_{A_1, A_2, \dots, A_{N_a}} (\mathbf{W}_c^U(A_1, A_2, \dots, A_{N_a}))_{ii}$ 为第 i 阶模态的能量吸收率,它反映了各阶模态吸收能量之间明确的量化对比关系。该准则提高了各阶模态中能量吸收率的最低值,但对其他模态的能量吸收率不作控制,也就不能保证总吸收能量达到最大。

为了解决这一问题,本文提出了一种综合的位置优化准则:

$$J_{\text{New}} = \max_{\tilde{\gamma}} \left\{ \sum_{i=1,2,\dots,N} \mathbf{W}_c^U \min_{A_1, A_2, \dots, A_{N_a}} \frac{(\mathbf{W}_c^U(A_1, A_2, \dots, A_{N_a}))_{ii}}{\max_{A_1, A_2, \dots, A_{N_a}} (\mathbf{W}_c^U(A_1, A_2, \dots, A_{N_a}))_{ii}} - \tilde{\gamma} \sum_{i=1,2,\dots,N^R} \mathbf{W}_c^R \max_{A_1, A_2, \dots, A_{N_a}} \frac{(\mathbf{W}_c^R(A_1, A_2, \dots, A_{N_a}))_{ii}}{\max_{A_1, A_2, \dots, A_{N_a}} (\mathbf{W}_c^R(A_1, A_2, \dots, A_{N_a}))_{ii}} \right\} \quad (16)$$

式中:

$$\sum_{i=1,2,\dots,N} \mathbf{W}_c^U \min_{A_1, A_2, \dots, A_{N_a}} \frac{(\mathbf{W}_c^U(A_1, A_2, \dots, A_{N_a}))_{ii}}{\max_{A_1, A_2, \dots, A_{N_a}} (\mathbf{W}_c^U(A_1, A_2, \dots, A_{N_a}))_{ii}} \quad \text{和} \\ \sum_{i=1,2,\dots,N^R} \mathbf{W}_c^R \max_{A_1, A_2, \dots, A_{N_a}} \frac{(\mathbf{W}_c^R(A_1, A_2, \dots, A_{N_a}))_{ii}}{\max_{A_1, A_2, \dots, A_{N_a}} (\mathbf{W}_c^R(A_1, A_2, \dots, A_{N_a}))_{ii}}$$

为 i 阶模态的加权吸收能量,引入惩罚函数即能量吸收率,对各阶模态的吸收能量进行重新分配,保证了各阶模态名义吸收的能量在同一范围内,统一了量化标准,然后依照名义吸收能量进行最优配置。该配置方法避免了各阶模态所吸收的能量变化较大的不足,而且也使能量吸收率得到提高。特别是对于大型空间器,可安放作动器的位置较多,位置优化准则的选择就尤为重要,优越的位置可以节约能量且减小空间飞行器的复杂性,并提高可靠性。

3 算例分析

选择四边简支板作为控制对象,板与压电片的物理参数如表 1 所示,表中: L 、 W 和 H 分别为材料的长、宽和高; E 、 ρ 和 μ 分别为材料的弹性模量、密度和泊松比; e_{31} 和 e_{32} 为压电应力常数; α 和 β 为黏性阻尼比系数。结构如图 1 所示,作动器与传感器贴在薄板的正反面,采用同位配置;假设结构阻尼是瑞利阻尼;选用两个作动器和传感器。考虑前 5 阶为控制模态,其后 3 阶为剩余模态。

表 1 板与压电片的材料属性

Table 1 Material properties of base and piezoelectric patch

Parameter	Value	
	Base	Piezoelectric patch
L/mm	1 140	18
W/mm	900	10
H/mm	2	0.1
E/GPa	207	63
$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 870	7 650
μ	0.292	0.30
e_{31}, e_{32}		-7.209
α, β	0.000 1	

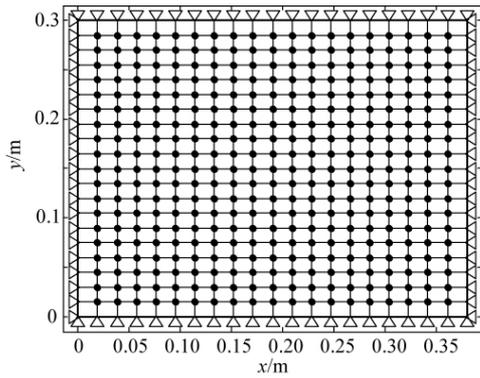


图 1 简支板有限元模型

Fig. 1 Simple supported plate finite element model

薄板的振动模式函数和固有角频率分别为

$$\phi_{ij} = \sin \frac{i\pi x}{L} \sin \frac{j\pi y}{W} \frac{2}{\sqrt{LW\rho H}} \quad (17)$$

$$\omega_{ij} = \left(\frac{i^2}{L^2} + \frac{j^2}{W^2} \right) \pi^2 \sqrt{\frac{D}{\rho H}} \quad (18)$$

式中: $D = EH^3/12(1-\mu^2)$ 为薄板的抗弯刚度。

利用遗传算法(GA)来求解所给出准则的配置位置^[3-4,11-12,14-15],遗传算法是模拟自然界遗传机制和生物进化论而形成的一种并行随机搜索的最优化方法。它将优胜劣汰和适者生存的生物进化原理引入到优化参数形成的编码串联群体中,按所选择的适应值函数,并通过遗传中的复制、交叉及变异对个体进行筛选,使适应值高的个体被保留下来,组成新的群体,新的群体既继承上一代的信息,又优于上一代,这样周而复始,群体中个体适应度不断提高,直至满足一定的条件。借鉴有限元网格划分的思想,将简支板划分成 60×60 的网格,则有 61×61 个节点,为安放压电片,除去边缘的节点。对 59×59 个节点进行编号,以压电片所处位置 x 方向和 y 方向的节点号作为变量,以二进制形式进行编码,染色体中二进制编码包

含压电片的位置序号。将每个坐标用 5 位二进制数表示出来,即用 10 位二进制可表示压电片位置,如 0001000001 表示(2,1)。适应值函数分别为 J_{Arbel} 、 J_{Bru} 和 J_{New} 。

染色体中二进制编码转化为十进制数的过程中,如果表示 x 和 y 方向序号的值大于 20,或是压电片有重合时,相应的适应度值设置为一很小的值,这样使其无法被选择复制,而被丢弃,从而保证不会选到不存在的节点。

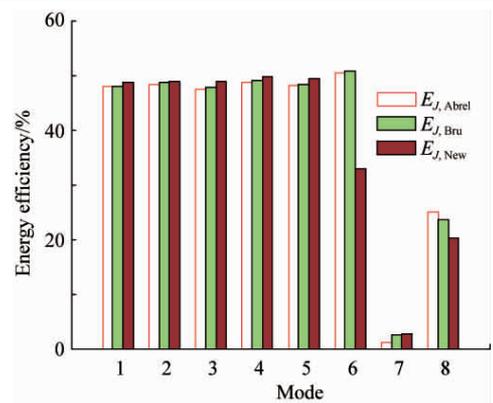
遗传算法参数的选取:种群数为 $N_{con} = 50$,交叉概率 $P_c = 0.3$,变异概率 $P_m = 0.05$,最大遗传代数 $N_{end} = 50$ 。

为了表示方便,将利用准则 J_{Arbel} 得到的位置和能量吸收率用 $L_{J,Arbel}$ 和 $E_{J,Arbel}$ 来表示;将利用准则 J_{Bru} 得到的位置和能量吸收率用 $L_{J,Bru}$ 和 $E_{J,Bru}$ 来表示;将利用准则 J_{New} 得到的位置和能量吸收率用 $L_{J,New}$ 和 $E_{J,New}$ 来表示。

经过计算,不考虑剩余模态的影响($\tilde{\gamma} = 0$)时,计算出作动器所吸收的能量与单独控制某阶模态所吸收能量的比值即能量吸收率,结果如表 2 所示,其柱状图如图 2 所示。

表 2 各阶模态能量吸收率($\tilde{\gamma} = 0$)Table 2 Energy efficiency of each mode ($\tilde{\gamma} = 0$)

Mode	$E_{J,Arbel}/\%$	$E_{J,Bru}/\%$	$E_{J,New}/\%$
1	47.964 2	48.477 7	48.648 0
2	48.408 8	48.686 8	48.864 8
3	47.466 7	47.887 4	48.870 1
4	48.619 3	49.016 7	49.785 6
5	48.222 3	48.316 7	49.310 9
6	50.350 9	50.813 2	32.913 3
7	1.111 6	2.535 9	2.747 6
8	25.000 7	23.516 9	20.195 5

图 2 各阶模态能量吸收率的柱状图($\tilde{\gamma} = 0$)Fig. 2 Histogram of energy efficiency of each mode ($\tilde{\gamma} = 0$)

从表 2 和图 2 中的数据可以看出,3 种准则前 5 阶模态吸收的能量相差不大,利用 J_{New} 准则计算得到的各阶模态吸收的能量比前两种方法计算得到的各阶模态吸收的能量要多 1%~2%,如果仅仅考察前 5 阶模态则每种准则得到的结果相差甚微。但是在实际进行主动控制时,后几阶模态也会对控制效果产生很大的影响。在利用前两种准则时,剩余模态所吸收的能量也较大。这就对控制产生不利的影响。这是因为压电片可选配置位置增多时,单一化的准则只能等到配置位置的次优解,准则 J_{New} 在目标函数中考虑到了各阶模态吸收能量之和的影响后,得到的配置位置才是最优解,所以能量的吸收率得到提高,各阶模态所吸收的能量均有所增加。

在考虑剩余模态的影响($\tilde{\gamma}=1$)后,经过计算,得到作动器的能量吸收率结果如表 3 所示,其柱状图如图 3 所示。

表 3 各阶模态能量吸收率($\tilde{\gamma}=1$)

Table 3 Energy efficiency of each mode ($\tilde{\gamma}=1$)

Mode	$E_{J,Abrel}/\%$	$E_{J,Bru}/\%$	$E_{J,New}/\%$
1	47.285 9	48.284 6	52.927 9
2	36.735 1	35.972 1	53.194 2
3	40.029 9	43.809 4	44.294 8
4	43.953 0	44.549 6	46.344 8
5	42.852 2	43.705 2	45.545 9
6	23.446 1	15.051 0	13.631 4
7	18.480 1	13.545 2	4.658 7
8	20.363 8	15.074 3	14.691 9

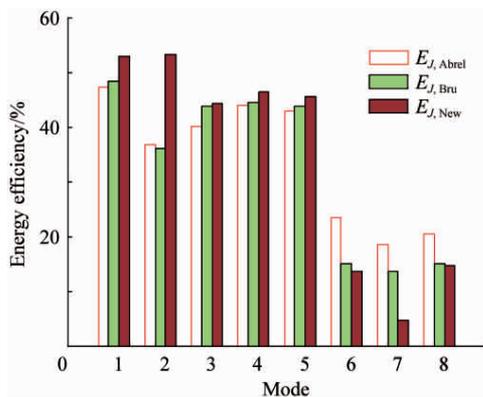


图 3 各阶模态能量吸收率的柱状图($\tilde{\gamma}=1$)

Fig 3 Histogram of energy efficiency of each mode ($\tilde{\gamma}=1$)

从表 3 和图 3 中的数据可以看出,加入剩余模态的影响后,利用准则 J_{New} 计算得到的第 1 阶模态吸收的能量比用另外两种准则计算得到的结

果高近 5%,第 2 阶模态更是高近 20%,其他各阶模态也比另外两种准则计算得到的吸收能量高,而且剩余模态所吸收的能量比其他两种准则计算得到的吸收能量小,系统的稳定性较强。在考虑剩余模态的影响后,前两种准则下各阶模态所吸收的能量都有所减少,但是用准则 J_{New} 所得到的结果前两阶的能量吸收率有所提高,对主动振动控制具有非常重要的意义。

本文给出了在 $\tilde{\gamma}=1$ 时配置出的压电片位置,在所求的位置处粘贴压电作动器来抑制薄板的振动^[16],在所求位置处板的另一面粘贴传感器,使驱动器和传感器同位配置,并设定各模态是可观测的,实施的速度控制律取为

$$\Phi = k\dot{q} \quad (19)$$

式中: $q=[q_1 \ q_2 \ \dots \ q_N]^T$, k 为反馈增益。代入式(9)可得

$$\dot{x} = (A - kB)x \quad (20)$$

在位置(Q 05, Q 06)处施加一个冲击, k 取值相同。表 4 列出了几种配置方法所得到的各阶模态阻尼系数,板中心的位移曲线如图 4 和图 5 所示。图 4 是振动控制曲线,图 5 比较了几种配置方法的振动曲线。按照本文所提出的优化结果配置驱动器和传感器,其控制效果优于其他两种配置方法。

表 4 各阶模态的黏性阻尼系数

Table 4 Viscosity damping of each mode

Mode	Viscosity damping c			
	Uncontrolled	J_{Abrel}	J_{Bru}	J_{New}
1	0.640 1	4.574 3	5.241 0	7.058 1
2	2.964 4	10.112 1	10.179 5	15.663 4
3	5.912 4	16.626 3	19.868 5	20.021 2
4	10.036 6	26.092 4	29.551 2	30.730 5
5	10.659 6	27.392 5	30.330 3	30.584 0

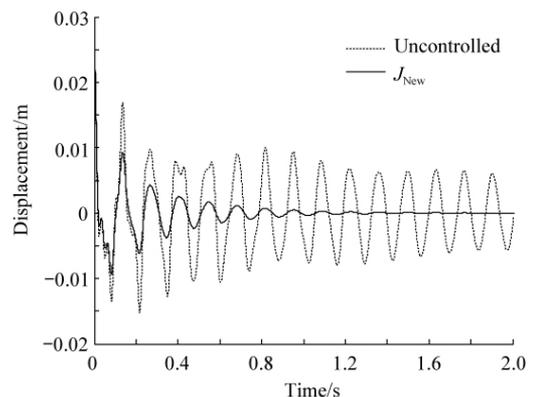


图 4 自由振动和受控后的曲线

Fig 4 Curves of active vibration before and after control

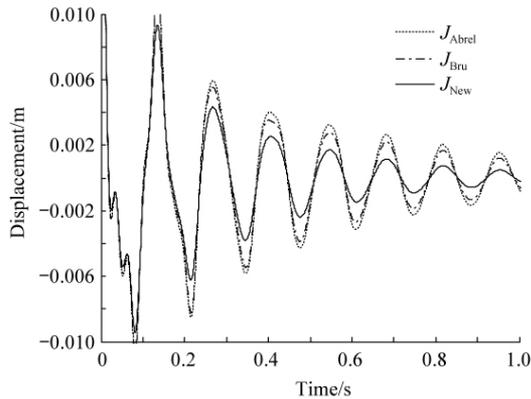


图5 振动控制位移比较

Fig. 5 Comparison of displacement under vibration control

4 结论

1) 将有限元分析方法与遗传算法相结合,可以很好地解决结构振动控制中的作动器位置优化问题。

2) 采用能量吸收率作为位置优化配置的目标函数,可以有效提高压电片的能量吸收效率,对于空间飞行器振动控制尤为重要。

3) 本文提出的位置优化准则,在目标函数中综合考虑了能量吸收率和总吸收能量两个因素,使得位置优化后的总吸收能量和各阶模态吸收能量都得到了明显的提高,且具有更强的适应性,为解决致动器优化配置问题提供了一种有效方法。

参 考 文 献

- [1] Arbel A. Controllability measures and actuator placement in oscillatory systems. *International Journal of Control*, 1981, 33(3): 565-574.
- [2] Bruant I, Gallimard L, Nikoukar S. Optimal piezoelectric actuator and sensor location for active vibration control, using genetic algorithm. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(10): 1615-1635.
- [3] Bruant I, Proslrier L. Optimal location of actuators and sensors in active vibration control. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005, 16(3): 197-206.
- [4] Lu Y G, Wei Y D, Lu C Y, et al. Optimal configuration of sensors and actuators for vibration control of cantilever plate. *Acta Armamentarii*, 2006, 27(1): 88-92. (in Chinese)
吕永桂, 魏燕定, 吕存养, 等. 悬臂板振动控制传感器/致动器优化配置. *兵工学报*, 2006, 27(1): 88-92.
- [5] Jha A K, Inman D J. Optimal sizes and placements of piezoelectric actuators and sensors for an inflated torus. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2003, 14(9): 563-576.
- [6] Wang W Y, Wei Y J, Wang C, et al. Optimal investigation of sensor/actuator placement for piezoelectric smart structure. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(4): 1025-1029. (in Chinese)
王威远, 魏英杰, 王聪, 等. 压电智能结构传感器/作动器位置优化研究. *宇航学报*, 2007, 28(4): 1025-1029.
- [7] Peng F J, Ng A, Hu Y R. Actuator placement optimization and adaptive vibration control of plate smart structures. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005, 16(3): 263-271.
- [8] Han J H, Lee I. Optimal placement of piezoelectric sensors and actuators for vibration control of a composite plate using genetic algorithms. *Smart Materials and Structures*, 1999, 8(2): 257-267.
- [9] Zhu D L, Yu J. Active vibration control of piezoelectric smart cantilever beam. *Journal of Hehai University Changzhou*, 2005, 19(4): 1-4. (in Chinese)
朱灯林, 俞洁. 压电智能悬臂梁的主动振动控制. *河海大学常州分校学报*, 2005, 19(4): 1-4.
- [10] Sun D C, Zhang H H, Wu H X, et al. Optimal placement and sizing of piezo actuators and experiment in vibration control of smart beams. *Chinese Space Science and Technology*, 1999(6): 46-52. (in Chinese)
孙东昌, 张洪华, 吴宏鑫, 等. 压电智能梁振动控制中致动片优化布置与实验. *中国空间科学技术*, 1999(6): 46-52.
- [11] Qiu Z C, Zhang X M, Wu H X, et al. Optimal placement and active vibration control for piezoelectric smart flexible cantilever plate. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 301(3-5): 521-543.
- [12] Yang Y, Jin Z, Soh C K. Integrated optimal design of vibration control system for smart beams using genetic algorithms. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 282(3-5): 1293-1307.
- [13] Hac A, Liu L. Sensor and actuator location in motion control of flexible structures. *Journal of Sound and Vibration*, 1993, 167(2): 239-261.
- [14] Roy T, Chakraborty D. Optimal vibration control of smart fiber reinforced composite shell structures using improved genetic algorithm. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 319(1): 15-40.
- [15] Liu W, Hou Z, Demetriou M A. A computational scheme for the optimal sensor/actuator placement of flexible structures using spatial H2 measures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(4): 881-895.
- [16] Yan T H, Mou Q C, Wang J Y. Optimal position and feedback gains of collocated sensor/PZT actuator. *Journal*

of *Vibration Engineering*, 1999, 12(4): 570-576. (in Chinese)

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. *振动工程学报*, 1999, 12(4): 570-576.

作者简介:

王军 男, 博士, 讲师。主要研究方向: 智能结构与复合材料结构。

Tel: 010-82338215

E-mail: wang_jun@buaa.edu.cn

Investigation of Piezoelectric Actuator Optimal Configuration for Structural Vibration Control

WANG Jun^{1,*}, YANG Yadong¹, ZHANG Jiaying¹, SU Hongbo^{1,2}

1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

2. Aeronautical Mechanical Engineering Department, Qingdao Branch of Naval Aeronautical and Astronautical University, Qindao 266041, China

Abstract: This paper presents an investigation of the optimal placement of piezoelectric actuators for the active vibration control of smart structures. Base on the state space equation and the controllability Grammian matrix, a new optimal target is set by the energy efficiency of the input energy. A finite element analysis (FEA) is employed to analyze the configuration of piezoelectric actuators, and then the FEA is combined with the genetic algorithm (GA) for optimal computation. The placements of actuators are defined with binary coding. A piezoelectric plate is simulated to attest the new optimal method and prove its superiority as compared with several other optimal methods.

Key words: smart structure; piezoelectric actuator; optimal placement; genetic algorithm; FEA

Received: 2011-05-23; Revised: 2011-06-22; Accepted: 2011-11-07; Published online: 2011-12-21 11:28

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20111221.1128.001.html DOI: CNKI:11-1929/V.20111221.1128.001

Foundation item: Visual Science Foundation for the Youth Scholars (YWF-10-02-014)

* Corresponding author. Tel.: 010-82338215 E-mail: wang_jun@buaa.edu.cn