

压电网壳抗震主动控制振动台试验*

马乾瑛¹, 刘志钦², 王社良³, 朱军强³, 熊二刚¹

(1. 长安大学建筑工程学院 西安, 710061)

(2. 河南城建学院土木与材料工程系 平顶山, 467036)

(3. 西安建筑科技大学土木工程学院 西安, 710055)

摘要 运用压电智能材料频响范围宽、响应速度快的特点,设计制作了双向受力压电主动杆件,通过动力特性以及驱动性能测试,得到了压电主动杆件的驱动增益函数和频响特征;基于遗传算法,对网壳结构进行主动控制时主动杆件的数目和布置位置进行了优化设计;运用8个自主研发的压电主动杆件,对一凯威特网壳模型进行了主动控制振动台试验,对压电主动杆件采取循环开/关闭驱动的方法,实现了对结构的多点最优控制,并使结构的竖向及水平加速度和位移均得到了良好的控制。结构的模态频率最大抑制达到14%,模态阻尼比最大提高了2.2。

关键词 网壳; 遗传算法; 主动控制; 振动台试验

中图分类号 TU352.1⁺1; TU317⁺.1

引言

空间网壳结构的厚度远小于其跨度尺寸,杆件长细比一般较大,属于缺陷敏感性结构^[1]。地震荷载作为结构设计时最重要的动力作用,由于随机性强、频谱丰富,很容易激发空间网壳结构产生振动进而引发动力破坏^[2]。主动控制基于现代控制理论,运用新型智能材料,集自感知、自判别、自诊断、自控制于一体,实现了结构的自适应控制,是未来结构发展的方向之一,为解决空间网壳结构在地震等动力荷载作用下的动力破坏问题提供了技术层面的支持^[3]。为了对空间结构抗震主动控制进行深入了解,笔者进行了相应的振动台试验研究。

1 主动控制理论

对于 n 个自由度的空间结构,进行闭环主动控制时的动力学方程^[4]可以表示为

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = D_s F(t) + B_s U(t) \quad (1)$$

其中: M 为结构质量矩阵; C 为结构阻尼矩阵; K 为结构刚度矩阵; \ddot{X} 为加速度向量; \dot{X} 为速度向量; X 为位移向量; D_s 为外荷载位置矩阵; $F(t)$ 为外荷载向量; B_s 为主动杆件位置矩阵; $U(t)$ 为控制力向量。

控制系统中常用的反馈有线性反馈、非线性反馈、自适应反馈和智能反馈等。当对结构进行主动控制时,根据实时观测的结构动力响应信号,通过一定的控制算法策略得到反馈,由控制装置作动,对结构反向施加相应的控制力,通过改变结构系统的质量、阻尼或刚度等动力特性项来实现对结构动力响应进行控制的目的^[5],控制流程如图1所示。

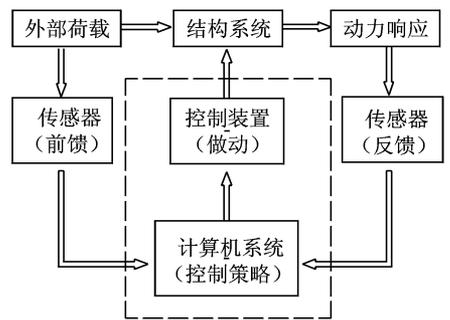


图1 结构主动控制流程图

2 主动杆件设计

作为新型智能材料,压电材料的正压电效应可以将机械力或变形转化为电流信号,负压电效应将电场作用转化为变形和机械力,很好地实现了机电耦合,使振动和电流之间方便、迅速地实现转换^[6]。目前,常常利用压电材料的正逆压电效应制作成智

* 国家自然科学基金资助项目(编号:51208041,51178388,10972168,51008245);国家重点实验室开放资助项目(编号:11JS061,11JS060)

收稿日期:2011-12-31;修改稿收到日期:2012-05-06

能驱动器,作为振动主动控制的核心部件。

由于压电材料的压电应变系数很小,因此实际应用中,常将多个压电片叠合制作成压电堆。压电堆工作时,利用与极化方向相同的压电效应值,各压电片的电路输入为并联关系,出力和位移为串联关系。这样,可以保证在一定电压输入下增大驱动力和位移的输出,满足压电材料在电场施加方向上驱动力和变形作为驱动作用器的性能要求^[7]。但是压电堆属于层叠结构,其受压能力强,受拉时容易断开,因此笔者设计制作了可以将拉力转化为压力作用的压电主动杆件^[8],如图2所示,充分发挥了压电堆受压性能良好的特点。

制作主动杆件时采用PTBS200/8×8/60型压电堆,出厂时压电堆的测试性能参数为:压电常数 $d_{33} \geq 780$;介电常数为 $4\ 000 \pm 20\%$;压电片厚度为 $0.13 \sim 0.14$ mm;片数为440;截面积为 $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$;驱动电压为 $0 \sim 200\text{ V}$;平均质量为 29.28 g ;平均长度为 60.24 mm ;绝缘电阻为 $8.3\text{ G}\Omega$;出力为 800 N ;刚度为 $2\ 400\text{ N/mm}$;静态电容为 $6.62\ \mu\text{F}$ 。

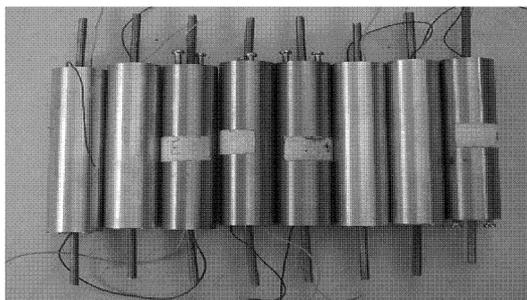


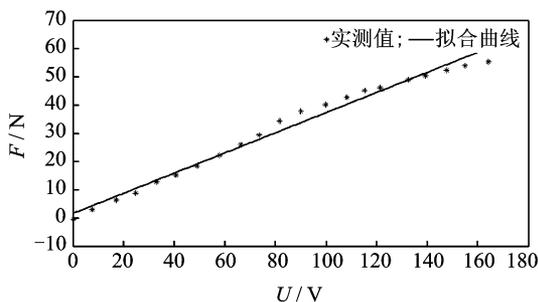
图2 压电主动杆件

运用压电主动杆件进行结构振动主动控制时,需要知道基于压电主动杆件的驱动性能,对所设计制作的压电主动杆件进行驱动性能测试,可得主动杆件的电压-驱动力是线性关系,其中1号主动杆件电压-驱动力关系如图3所示。

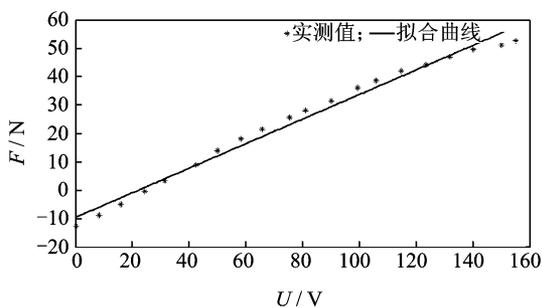
3 试验设计

3.1 试验模型

为了验证结构抗震主动控制的效果,采用所设计制作的压电主动杆件对一凯威特空间网壳进行主动控制振动台试验研究。网壳模型如图4所示,杆件为空心合金杆,弹性模量为 $1.65 \times 10^{11}\text{ N/m}^2$,密度为 $3\ 100\text{ kg/m}^3$,杆件截面积为 28.27 mm^2 ,网壳模型



(a) 1#主动杆加电压



(b) 1#主动杆减电压

图3 1#主动杆件电压-驱动力关系图

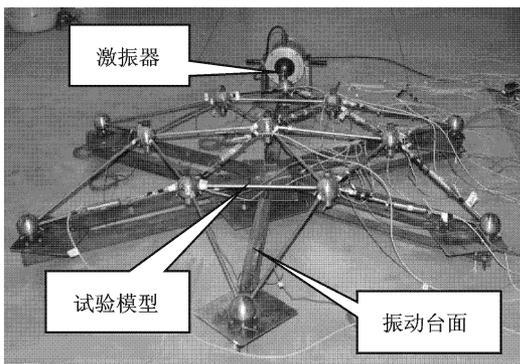


图4 试验模型图

跨度为 $1\ 600\text{ mm}$,矢高为 160 mm ,节点处配置 1.5 kg 重的实心钢球作为配重。

3.2 控制策略

对空间网壳进行多点主动控制试验时,需要分别对8个压电主动杆件进行电源输入。为了简化电路,降低成本,同时减少电路之间相互干扰,设计了满足多路开关切换功能的电路板,采用一个驱动电源,分时对各路压电主动杆件通过多路开关切换进行轮流驱动,开关切换时间设置为 10 ms ,通过单片机加以实现。

3.3 试验流程

进行主动控制振动台试验时,文献[9]提出基于

轴向力计算反馈增益时可能存在虚假控制现象,即应变片测得的杆件应变恒为0,但结构的振动并没有得到有效控制。因此,通过动态电阻应变仪测得结构的动态应变,以杆件两端的位移差作为反馈依据,由A/D转换卡将数字信号输入到计算机中,经过反馈计算,得到增益输出,由D/A转换卡将模拟信号输入到低通滤波器,实现驱动力的施加。整个试验流程如图5所示。

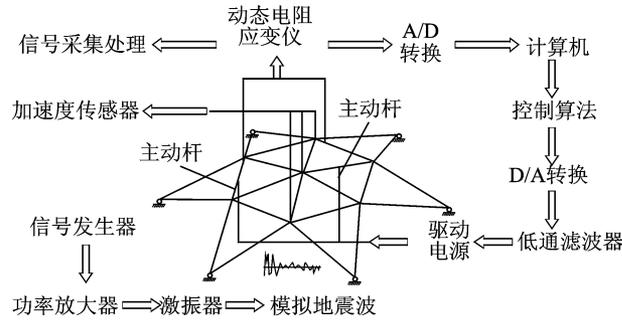


图5 网壳结构抗震主动控制流程图

进行试验时,采用康拓公司生产的数据采集卡和输出卡,数据电压量程为 $-5\sim 5\text{ V}$ 。工作时需要把A/D转换卡满量程电压信号放大到与模拟输出信号对应的电平值,即将主动杆件的电压-驱动力关系转化为与A/D转换卡对应的值,根据系统的负反馈控制模型^[10],将主动杆件的电压-驱动力关系转化为力输出与驱动电源量程之间的关系。为了提高输出效率,取压电主动杆件在加、减电压时对应的力输出平均值作为增益,拟合出数字信号-驱动力输出增益关系,则驱动电压表示为

$$U = k \text{diag}(\mathbf{g}_i) \mathbf{d}_i + \mathbf{c}_i \quad (2)$$

其中: k 为反馈调幅系数; $\text{diag}(\mathbf{g}_i)$ 为增益系数矩阵; \mathbf{d}_i 为杆件两节点轴向相对动应变; \mathbf{c}_i 为增益常数项。

根据电压与驱动力之间的关系,可得 $\text{diag}(\mathbf{g}_i)$ 及 \mathbf{c}_i 如表1所示。

表1 增益系数表

控制通道	对应主动杆件	\mathbf{g}_i	\mathbf{c}_i
1	4#	0.421 8	0.219 0
2	3#	0.293 1	0.190 0
3	5#	0.994 6	0.239 8
4	2#	0.179 5	0.012 6
5	6#	0.362 0	0.259 1
6	8#	0.269 3	-0.124 1
7	1#	0.350 7	0.232 0
8	7#	0.193 5	0.614 7

4 主动杆件优化设计

压电主动杆件布置位置的优化关系到主动控制的效果和效率。遗传算法是一种基于进化论原理,通过模拟自然界适者生存机制进行全局最优化设计的高效算法。遗传算法借鉴自然界中染色体和基因等进化论概念^[11],对决策变量进行编码,并作为直接运算对象,可以方便地解决无数值或者难于用数值表达即只有代码概念等问题的优化。在优化过程中,将目标函数转换成可以直接作为优化目标的适应度函数,避免了对优化函数的求导。遗传算法应用遗传操作因子,使用多个搜索点同时进行优化,避免了对一些不必要点的搜索。在搜索的过程中,遗传算法基于自适应的概率化方法,提高搜索的灵活性,通过编码、产生初始群体、群体更新、适应度计算、复制、选择、交叉、变异和终止等操作以概率1收敛于目标值,实现最优化设计^[12]。

对空间网壳结构进行抗震主动控制试验优化设计时,将结构运动方程转化为状态方程^[13]

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{A}\mathbf{p} + \mathbf{B}\mathbf{f} \quad (3)$$

其中: $\mathbf{p} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix}$; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ -\mathbf{\Omega} & -\mathbf{D} \end{bmatrix}$; $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{\phi}^T \mathbf{b} \end{bmatrix}$; $\mathbf{\Omega} = \text{diag}[\omega_i^2]$; $\mathbf{D} = \text{diag}[2\xi_i \omega_i]$; ω_i 为结构的第*i*阶固有频率; ξ_i 为结构的第*i*阶模态阻尼比; \mathbf{f} 为控制力。

控制性能指标可以表示为

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{p}^T \mathbf{Q} \mathbf{p} + \mathbf{f}^T \mathbf{R} \mathbf{f}) dt \quad (4)$$

对网壳结构进行主动控制试验时,主动杆件的布置位置优化设计将性能指标直接作为基于遗传算法的适应度函数^[14]。在优化设计过程中,初始种群的大小取为20,最大遗传代数取为50,操作中变异概率取为0.02,交叉概率取为0.8,采用多断点交叉方法产生新的后代。为了避免搜索过程中出现同一位置重复分配的情况,当出现重复解时,进行强制变异操作,将其中一个重复解强制变异为其他解。

分别得到杆件数量与适应度函数值的关系如图6所示。可以看出,适应度函数值随着主动杆件数量的增加而减小,说明控制效果随着主动杆件数目的增加而增强。当主动杆件数目达到8个后,适应度值变化不大,说明采用8个主动杆件进行主动控制效果最佳。图7所示为采用8根主动杆件进行主动控制时的布置位置,此时适应度值为 1.18×10^7 ,计算次数为340,与枚举法得到同样最优解的计算次数

$C_{24}^8=735\ 471$ 相比,效率显著提高。由图7可以看出,主动杆件的最优布置位置位于各阶振型变形最大的地方。根据文献[9],采用布置主动杆件位置的杆件动力响应数据作为反馈计算的数据。

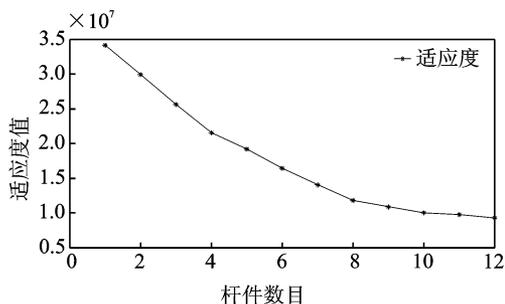


图6 主动杆件数目-适应度关系图

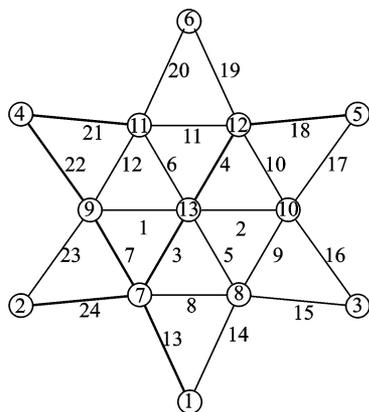


图7 主动杆件布置图

5 主动控制试验

5.1 试验工况及测点布置

采用西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室开发的小型振动台,对空间网壳结构进行抗震主动控制试验研究。输入模拟地震动信号,通过对信号发生器输出频率的调整对地震波进行压缩,并通过对波形幅值的调整,分别测量不同工况下对结构施加主动控制前、后的动力响应,进行对比分析。具体工况如表2所示。

表2 试验工况

波形	输出频率/ mHz	加速度幅值/ g
EL-Centro 波	146.4	100,200,300,400,500,600,700
	292.8	100,200,300,400,500

采用加速度传感器对振动台台面水平加速度、结构节点处的水平加速度和竖向加速度进行采集,节点编号如图8所示。

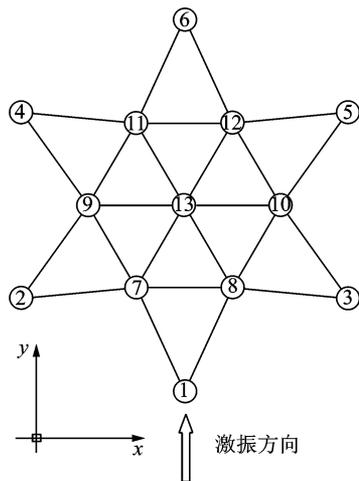
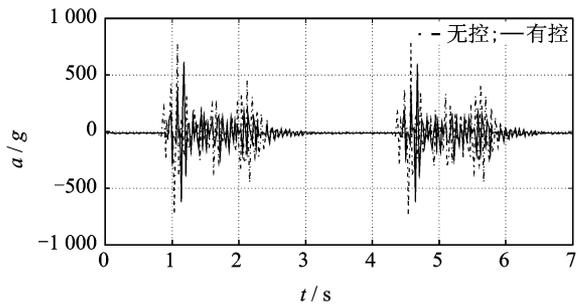


图8 测点位置图

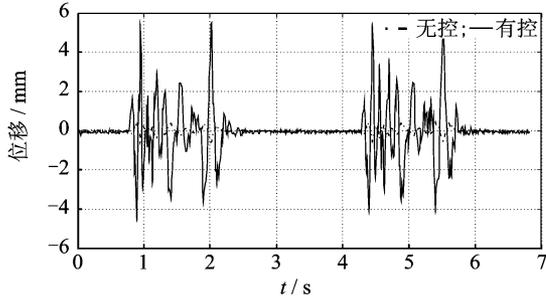
5.2 结果及分析

根据主动控制前、后各测点动力响应情况,采用最大值评估指标对试验效果进行评价,用来衡量结构位移、加速度反应剧烈程度的变化情况^[15]。通过对比控制前、后结构的频响函数、模态频率和模态阻尼比的变化,衡量控制效果和结构整体抗震性能。

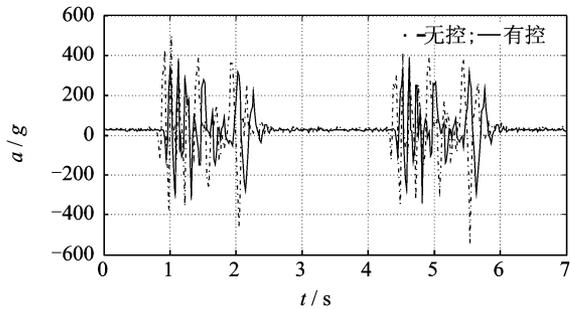
图9为输入500gEL-Centro地震波工况时,对结构进行控制前、后节点7处加速度及位移响应时程图。结合对结构进行控制前、后节点9,11,13处的动力响应时程可以得知,对结构进行主动控制后,节点7,9,11,13处竖向加速度响应峰值控制分别达到25.5%,9.6%,12.7%和40.1%;竖向位移控制分别达到-1001%,15.8%,62.8%和63.9%;水平向加速度控制分别达到23.3%,35.3%,13.8%,12.8%;水平位移控制分别达到-109%,44.3%,93%和-2%。可见,由于主动控制作用,结构的加速度响应得到了明显控制,说明所设计制作的压电主动杆件适合于结构抗震性能的要求。对于结构位移的控制,在局部出现控制效果放大的现象,说明由于控制效应,结构的动力特性发生了变化,出现了应力重分布的情况。由于结构是对称形式,对结构顶点处的竖向位移控制效果明显,对于结构荷载施加方向的加速度和位移控制效果优于其他方向的控制效果,同时随着工况振幅的增大控制效果更为明显。



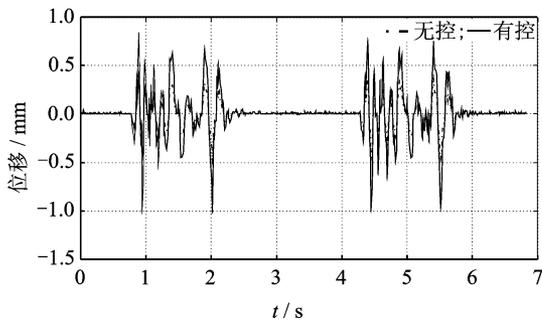
(a) 节点竖向加速度控制时程图



(b) 7节点竖向位移控制时程图



(c) 7节点水平加速度控制时程图



(d) 7节点水平位移控制时程图

图9 输入500gEL-Centro波时7节点响应时程

控制前、后节点13处竖向加速度频响比较如图10所示,模态频率和模态阻尼比较见表3。可以看出,由于主动控制作用,在整个频域范围内,结构的动力响应均得到了良好的控制,结构的1,2,3阶模态频率均得到了抑制,其中第2阶模态频率抑制达到14%。结构的模态阻尼得到了提高,第1阶模态阻尼增大了2.2。可见,由于主动控制作用,结构的整体动力性能得到了提高。

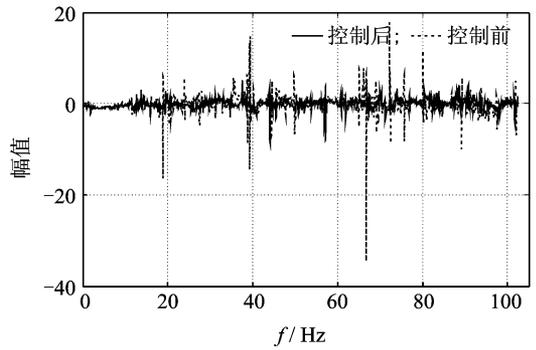


图10 控制前、后频响比较图

表3 控制前、后结构模态频率计阻尼

阶次	状态	模态频率/Hz	模态阻尼/%
1阶	控制前	37.4	16.1
	控制后	33.8	18.3
2阶	控制前	68.7	5.3
	控制后	59.1	6.7
3阶	控制前	88.5	3.6
	控制后	84.8	5.4

6 结论

1) 所设计的压电主动杆件性能稳定,适合于结构在抗震中的主动控制应用。

2) 采用遗传算法进行优化设计,适合于压电主动杆件布置位置这类离散性问题的解决。选取合理的适应度函数不仅关系到优化结果的优劣,也关系到优化效率的提高。在优化搜索的过程中,采用强制变异的方法,可以避免多点优化出现同解的情况。

3) 设计合理的控制电路,在简化控制策略的同时,可以降低成本,提高设备利用率,减少电路间的相互干扰,同时达到对结构多点主动控制的目的。

4) 对结构进行主动控制,可以改变结构的动力特性,抑制结构的模态频率,并提高结构的模态阻尼,使结构中的应力重分布,从而增强了结构的整体抗震性能。

5) 对结构加速度的控制,随着荷载频谱的不同而表现出不同的控制效果,对于位移的控制,主要与结构的动力性能参数有关,而与输入荷载的形式关系不大。

6) 本试验对结构抗震进行主动控制时,控制律基于结构的数学模型,因此模型建立的精确性对试验结果影响较大。

参 考 文 献

- [1] 沈世钊,陈昕. 网壳结构稳定性[M]. 北京: 科学出版社,1999:245.
- [2] 支旭东,范峰,沈世钊. 单层球面网壳在地震下的响应特性与失效机理[J]. 世界地震工程,2007(4):88-94. Zhi Xudong, Fan Feng, Shen Shizhao. Responses and failure mechanism of the single-layer reticular domes subjected to earthquake motion [J]. World Earthquake Engineering, 2007(4):88-94. (in Chinese)
- [3] Nana Nbandjo B R, Woaf P. Active control with delay of horseshoes chaos using piezoelectric absorber on a buckled beam under parametric excitation [J]. Chaos, Solitons & Fractals,2007,32(1):73-79.
- [4] 欧进萍. 结构振动控制[M]. 北京: 科学出版社,2003:39-44.
- [5] 翁光远. 大跨空间网壳结构地震响应分析及振动控制研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2011.
- [6] 侯志伟,陈仁文,徐志伟,等. 压电纤维复合材料在结构减振中的应用[J]. 振动、测试与诊断,2010,30(1):51-54. Hou Zhiwei, Chen Renwen, Xu Zhiwei, et al. Application of macro-fiber composite to structural vibration suppression[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010,30(1):51-54. (in Chinese)
- [7] Ray M C, Mallik N. Active control of laminated composite beams using a piezoelectric fiber reinforced composite layer[J]. Smart Materials and Structures, 2004,13(1):146-152.
- [8] 王社良,马乾瑛,朱军强,等. 一种压电套筒式拉压双向受力主动抗震控制装置[P]. 中国,101736829A [P]. 2010-07-07.
- [9] 李东旭. 大型挠性空间桁架结构动力学分析与模糊振动控制[M]. 北京: 科学出版社,2008:121-179.
- [10] Birman V. Active control of composite plates using piezoelectric stiffeners [J]. International Journal of Mechanical Sciences,1993,35(5):387-396.
- [11] 唐文艳. 结构优化中的遗传算法研究和应用[D]. 大连:大连理工大学,2002.
- [12] 傅武军,朱昌明,叶庆泰. 多目标遗传算法在电梯主动导轮系统集成优化设计中的应用[J]. 振动工程学报,2006,19(2):227-233. Fu Wujun, Zhu Changming, Ye Qingtai. Application of multi-objective genetic algorithm to integrated plant/controller optimization for active guide roller design[J]. Journal of Vibration Engineering,2006,19(2):227-233. (in Chinese)
- [13] 吕永桂,陈凯,魏燕定. 智能杆致动器优化配置及扭转主动控制试验[J]. 振动、测试与诊断,2010,30(4):400-404. Lü Yonggui, Chen Kai, Wei Yanding. Intelligent actuator placement and active torsional vibration control experiment on a circular tube[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010,30(4):400-404. (in Chinese)
- [14] 蓝发超,王洪. 基于 Matlab 的遗传算法程序设计[J]. 广西物理,2008(1):32-34. Lan Fachao, Wang Hong. Genetic algorithm program design based on the Matlab [J]. Guangxi Physics, 2008(1):32-34. (in Chinese)
- [15] 徐浩,陈怀海,游伟倩. 多输入多输出冲击振动试验研究[J]. 振动、测试与诊断,2010,30(2):143-148. Xu Hao, Chen Huaihai, You Weiqian. Input signal identification in multiple input and multiple-output shock vibration test [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010,30(2):143-148. (in Chinese)



第一作者简介:马乾瑛,男,1982年12月生,博士、讲师。主要研究方向为结构抗震主动控制。曾发表《大跨空间结构智能监测优化设计及信号处理》(《振动、测试与诊断》2011年第21卷第3期)等论文。
E-mail:mqianying@126.com