

# 悬臂、四边固支板及低频隔振体系 压电振动控制研究

黄 伟

国机集团科学技术研究院有限公司国机集团工程振动控制技术研究中心, 北京

收稿日期: 2023年2月22日; 录用日期: 2023年3月23日; 发布日期: 2023年3月31日

## 摘 要

对悬臂板、四边固支板及低频隔振系统开展了较为系统的压电振动控制研究, 并在有限元环境, 进行了压电控制电压的输入设计。数值计算结果表明, 压电振动控制效果显著, 验证了所提压电振动控制方法的有效性。本研究对于工程结构的压电振动控制具有指导意义, 对于气浮振动控制等低频隔振系统开展压电主动控制, 具有重要的实际工程应用价值。

## 关键词

悬臂板, 四边固支板, 低频隔振体系, 压电振动控制

# Research on Piezoelectric Vibration Control of Cantilever, Four-Side Fixed Plate and Low-Frequency Vibration Isolation System

Wei Huang

SINOMACH Technology Research Center of Engineering Vibration Control, SINOMACH Academy of Science and Technology Co., Ltd., Beijing

Received: Feb. 22<sup>nd</sup>, 2023; accepted: Mar. 23<sup>rd</sup>, 2023; published: Mar. 31<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

The piezoelectric vibration control of cantilever plate, four-side fixed plate and low-frequency vibration isolation system was systematically studied in this paper, and the voltage input design of

piezoelectric control was carried out using finite element method. The numerical results showed that the piezoelectric vibration control effect was significant, and the effectiveness of the proposed piezoelectric vibration control strategy was verified. This research has guiding significance for the piezoelectric vibration control of engineering structures, and has important practical engineering application value for the piezoelectric active vibration control of low-frequency vibration isolation systems such as air floating vibration control.

## Keywords

Cantilever Plate, Four-Side Fixed Plate, Low Frequency Vibration Isolation System, Piezoelectric Vibration Control

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来,随着学者们对压电智能材料的不断深入研究,压电材料在振动控制领域的应用越来越广泛 [1] [2] [3] [4]。文献[5]最早利用压电材料开展了梁的振动控制研究。

压电振动控制的分析方法主要有有限元法[6]、解析法[7]以及半解析法[8]等。基于压电材料进行主动控制,主要是通过结构上粘贴压电单元,通过压电“电-力”转换产生的力来抑制振动,该方法能够较好地适应外部环境的变化,可以积极抵消外部环境振动。

本文将分别对悬臂板、四边固支板及低频隔振基台进行压电振动控制研究,并在有限元环境,研究并提出适用的压电振动控制方法。

## 2. 悬臂板压电振动控制

首先对某悬臂板进行压电振动控制研究,该板左侧固定。悬臂板为铝板,长度、宽度及厚度分别为  $504 \times 25.4 \times 0.8$  mm,压电作动器贴片的尺寸为  $72 \times 25.4 \times 0.61$  mm。铝板的弹性模量为  $6.8 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>,泊松比 0.32,密度 2800 kg/m<sup>3</sup>;压电材料 PZT-5H [9]的密度为 7500 kg/m<sup>3</sup>,恒定电场下的弹性刚度矩阵为:

$$C^E = \begin{bmatrix} 12.6 & 7.95 & 8.41 & 0 & 0 & 0 \\ & 12.6 & 8.41 & 0 & 0 & 0 \\ & & 11.7 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 2.33 & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & & 2.3 & 0 \\ & & & & & 2.3 \end{bmatrix} \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}.$$

压电应变矩阵为:

$$h^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 17 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 17 & 0 \\ -6.5 & -6.5 & 23.3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ C} \cdot \text{m}^{-2}.$$

介电常数矩阵为:

$$b = \begin{bmatrix} 1.503 & 0 & 0 \\ 0 & 1.503 & 0 \\ 0 & 0 & 1.3 \end{bmatrix} \times 10^{-8} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$$

悬臂板端部位置作用一个幅值 0.1 N 的竖向阶跃荷载。

数值计算采用 ANSYS 有限元分析软件, 悬臂板采用 solid 45 单元模拟, 压电作动器采用 solid 5 单元模拟。

仅考虑上部粘贴压电片的悬臂板振动控制模型如图 1 所示。

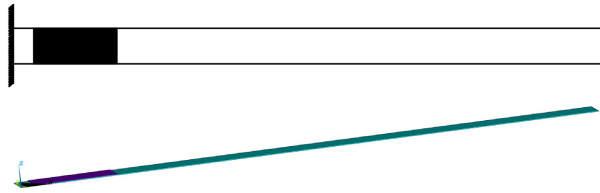


Figure 1. Cantilever plate structure with piezoelectric sheet pasted on the upper side

图 1. 上部单侧粘贴压电片的悬臂板结构

压电振动控制是以控制悬臂板上的 4、6 号节点的 x 向应变为目标, 即 $[ux(4) - ux(6)]/dx$ , 受文献[10]启发, 本研究中压电片输入电压的控制设计为:

$err = 0 - ks \times [ux(4) - ux(6)]/dx$ ,  $va = kc \times kv \times err$ , 其中,  $ux$  为获取节点的 x 向位移,  $err$  为应变偏差,  $ks$  为增益系数, 取  $1 \times 10^3$ ,  $kv$  为增益系数, 取  $1 \times 10^3$ ,  $kc$  为增益系数, 分别取 0, 0.1, 0.5,  $dx$  为两节点间的水平距离,  $dx = 0.012$ ,  $va$  为控制电压。

图 2 给出悬臂板端部中点位置的竖向变形曲线, 可见, 当  $kc = 0.5$  时, 悬臂板的振动控制效果显著, 明显优于无控制状态( $kc = 0$ ), 且优于  $kc = 0.1$  的控制状态。压电片的控制电压如图 3 所示。

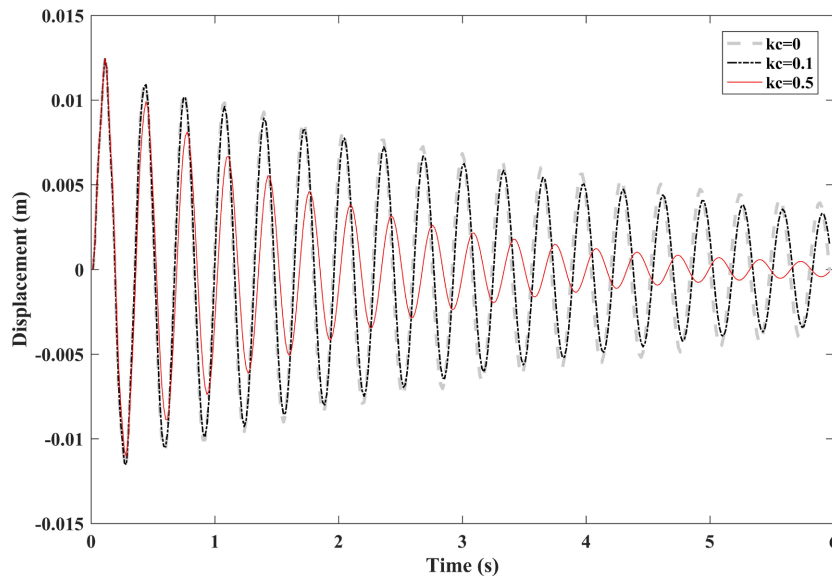


Figure 2. Tip response of cantilever plate structure with piezoelectric sheet pasted on the upper side

图 2. 仅上部粘贴压电片的悬臂板端部响应

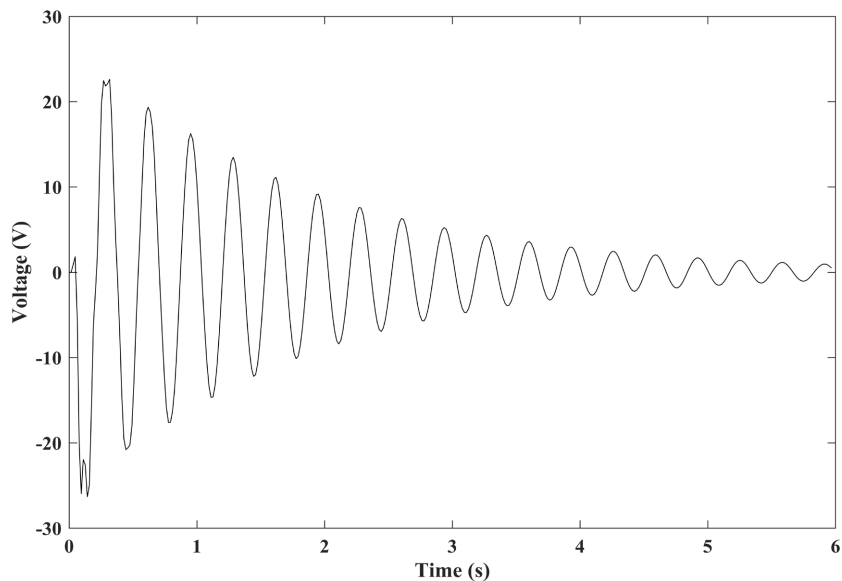


Figure 3. Control voltage

图 3. 控制电压

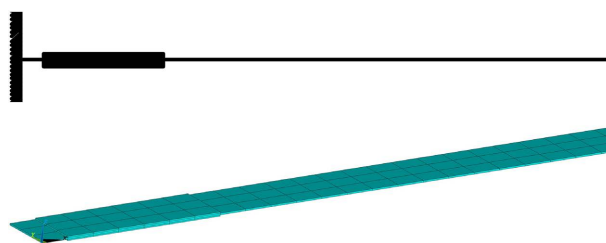


Figure 4. Cantilever plate structure with piezoelectric sheet symmetrically pasted on the upper and lower side

图 4. 上、下部对称粘贴压电片的悬臂板结构

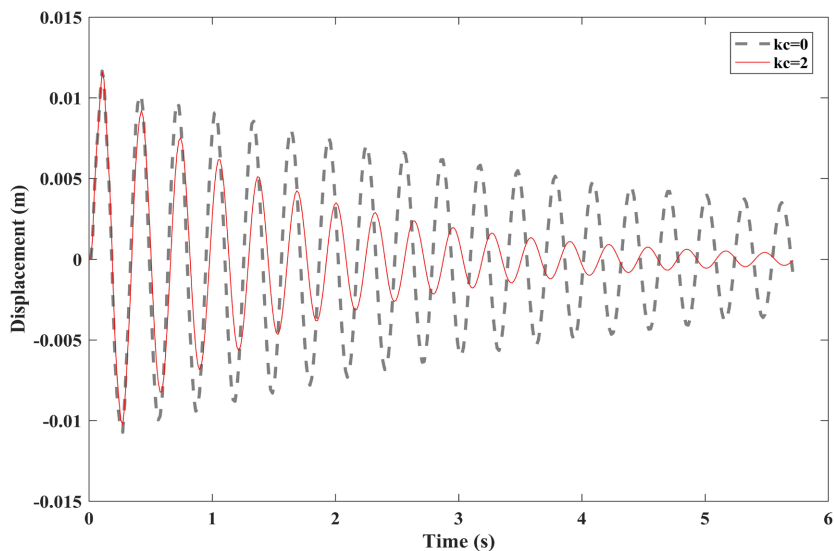


Figure 5. Tip response of cantilever plate structure with piezoelectric sheet symmetrically pasted on the upper and lower side

图 5. 上、下部对称粘贴压电片的悬臂板端部响应

考虑上、下部对称粘贴压电片的悬臂板振动控制模型如图 4 所示。图 5 给出悬臂板端部中点位置的竖向变形曲线，可见，当  $kc = 2$  时，悬臂板端部的振动控制效果显著，明显优于无控制状态( $kc = 0$ )。

### 3. 四边固支板压电振动控制

在对悬臂板压电振动控制研究的基础上，开展四边固支薄板的压电振动控制。薄板为铝板，铝板长、宽、厚分别为  $305 \times 25.4 \times 0.8 \text{ mm}$ ，压电作动器贴片的尺寸为  $20 \times 20 \times 1 \text{ mm}$ 。固支板跨中位置作用一个幅值  $0.1 \text{ N}$  的竖向阶跃荷载。板采用 shell63 单元模拟，压电作动器采用 solid 5 单元模拟。考虑薄板上部跨中布置压电作动器，模型如图 6 所示。

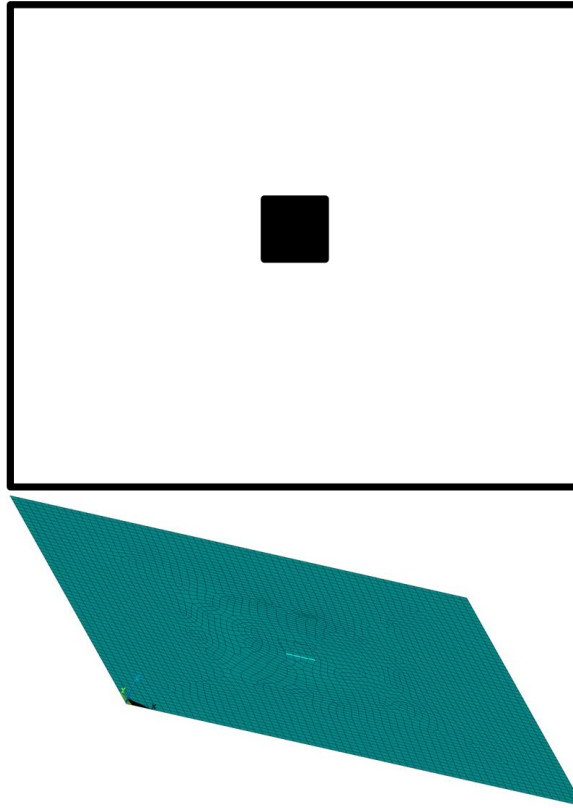


Figure 6. Four-side fixed plate with piezoelectric sheet pasted on the upper part

图 6. 上部粘贴压电片的四边固支薄板

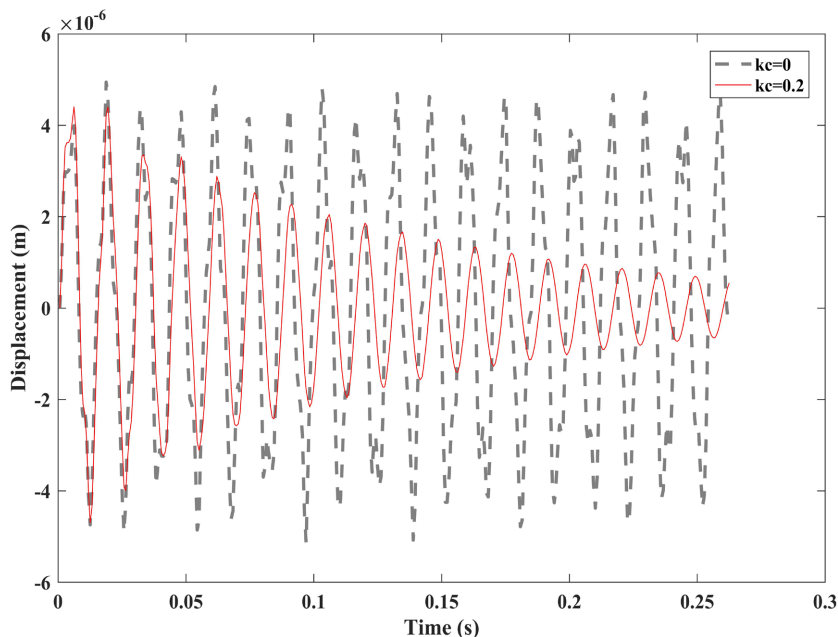
压电振动控制是以控制悬臂板上的 2453、2461 号节点的  $x$  向应变为目标，即  $[ux(2453) - ux(2461)]/dx$ ，控制过程为：

$err = 0 - ks \times [ux(2453) - ux(2461)]/dx$ ， $va = kc \times kv \times err$ ， $ks$  取  $1 \times 10^3$ ， $kv$  取  $1 \times 10^3$ ， $kc$  分别取 0，0.2， $dx = 0.0039$ 。

图 7 给出固支薄板中点位置的竖向变形曲线，可见，当  $kc = 0.2$  时，薄板的振动控制效果明显优于无控制状态( $kc = 0$ )。

### 4. 低频隔振系统压电振动控制

对于诸如气浮型的低频振动控制系统，在微振动控制领域应用较为广泛，被动式的低频隔振系统虽能够隔离较大频带范围内的环境扰动，但对于较低频成分的控制效果不理想，所以，往往需要附加主动控制。

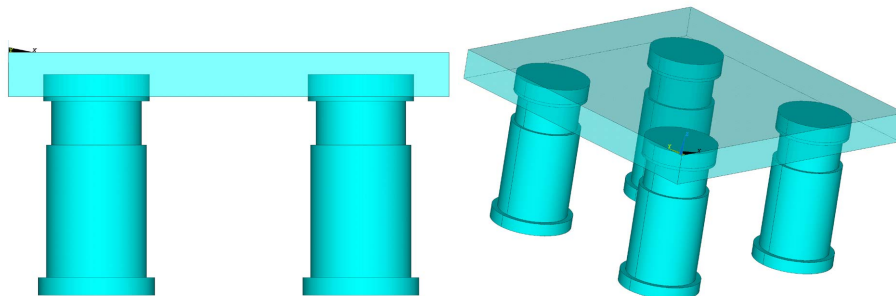


**Figure 7.** Midpoint response of four-side fixed plate with piezoelectric sheet pasted on the upper part

**图 7.** 上部粘贴压电片的四边固支薄板中点响应

接下来, 将在对悬臂薄板以及四边固支薄板进行压电振动控制研究的基础上, 开展低频隔振系统的压电振动控制研究。

某隔振基台, 长、宽、厚分别为 1 m、1 m、0.1 m; 弹性模量  $6.8 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>, 泊松比 0.32, 密度 2800 kg/m<sup>3</sup>, 基台采用 solid 45 单元模拟, 压电作动器采用 solid 5 单元模拟, 有限元模型如图 8 所示。



**Figure 8.** Finite element model of low-frequency vibration isolation system

**图 8.** 低频隔振系统有限元模型

基台上部中间位置作用一个幅值 0.1 N 的竖向阶跃荷载。隔振基台竖向设计频率为 1 Hz, 水平及竖向考虑 0.15 的阻尼比。在隔振基台下部中间位置粘贴压电作动器, 压电片的尺寸为  $100 \times 100 \times 1$  mm。

压电振动控制是以控制基台上的 150、151 号节点的  $z$  向应变为目标, 即  $[uz(151) - uz(150)]/dx$ ,  $err = 0 - ks \times [uz(151) - uz(150)]/dx$ ,  $va = kc \times kv \times err$ , 其中,  $ks = 1 \times 10^3$ ,  $kv = 1 \times 10^3$ ,  $kc$  分别取 0, 25, 50,  $dx = 9.5 \times 10^{-4}$ 。

图 9 给出基台中点位置的竖向变形曲线, 可见,  $kc = 50$  时, 基台的振动控制效果明显优于无控制状态 ( $kc = 0$ ), 且优于  $kc = 25$  的控制状态。

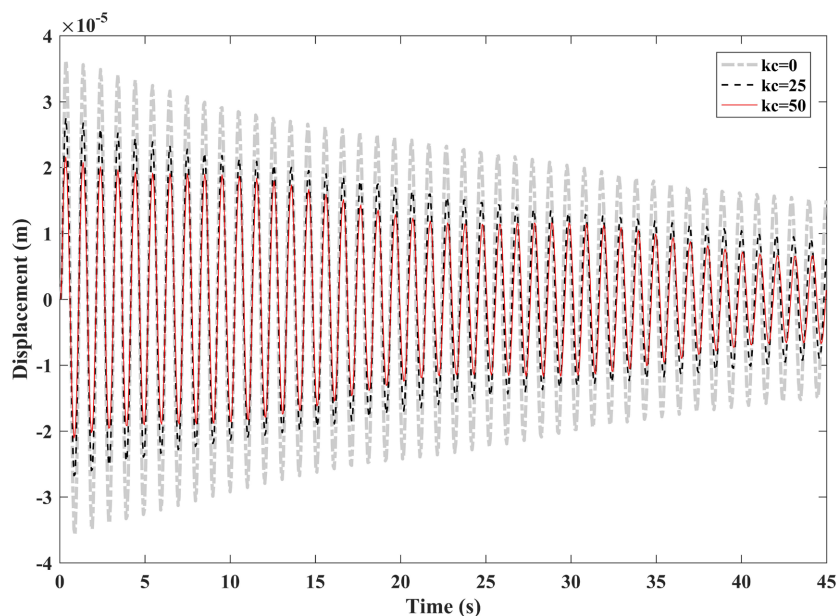


Figure 9. Piezoelectric vibration control response of low-frequency vibration isolation system

图 9. 低频隔振系统压电振动控制响应

## 5. 小结

本文对悬臂板、四边固支板及低频隔振系统开展了较为系统的压电振动控制研究，并在有限元环境，进行了压电控制电压的输入设计。数值计算结果表明，采取的压电振动控制方法，对于以上三种结构的振动控制效果显著，验证了所提压电振动控制方法的有效性。

本研究对于工程结构压电振动控制具有指导意义，特别是对于低频隔振系统的压电振动控制，具有重要的现实意义，实际工程中，可基于本研究，面向气浮等低频振动控制系统，附加压电智能材料，进行主动控制。

## 基金项目

国机集团科学技术研究院有限公司青年基金项目“高层建筑实验室集群多源振害控制及运维监测关键技术研究与应用”；中国机械工业集团青年基金重点项目“大科学工程群微纳级环境振动控制关键技术研究与应用”；中国机械工业集团重大技术开发专项“建筑与装备工程振震双控关键技术研发及应用示范”。

## 参考文献

- [1] Pai, P.F., Wen, B., Naser, A.S., *et al.* (1998) Structural Vibration Control Using PZT Patches and Non-Linear Phenomena. *Journal of Sound and vibration*, **215**, 273-296. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1998.1612>
- [2] Ma, K. (2003) Vibration Control of Smart Structures with Bonded PZT Patches: Novel Adaptive Filtering Algorithm and Hybrid Control Scheme. *Smart Materials and Structures*, **12**, Article No. 473. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/12/3/319>
- [3] Gurses, K., Buckham, B.J. and Park, E.J. (2009) Vibration Control of a Single-Link Flexible Manipulator Using an Array of Fiber Optic Curvature Sensors and PZT Actuators. *Mechatronics*, **19**, 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2008.09.005>
- [4] Shen, Y. and Homaifar, A. (2001) Vibration Control of flexible Structures with PZT Sensors and Actuators. *Journal of Vibration and Control*, **7**, 417-451. <https://doi.org/10.1177/107754630100700306>

- 
- [5] Bailey, T. and Hubbard Jr., J.E. (1985) Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, **8**, 605-611. <https://doi.org/10.2514/3.20029>
- [6] Sosso, B., da Silva Andrade, S., Vieira Jr., L.C.M., *et al.* (2020) Probabilistic Modelling of the Robustness of Reinforced Concrete Frames Accounting for Material Property Variability Using a Layered Beam Finite Element Approach. *Engineering Failure Analysis*, **118**, 104789. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104789>
- [7] Ruocco, E., Reddy, J.N. and Sacco, E. (2021) Analytical Solution for a 5-Parameter Beam Displacement Model. *International Journal of Mechanical Sciences*, **201**, 106496. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106496>
- [8] Wu, D., Liu, A., Huang, Y., *et al.* (2018) Dynamic Analysis of Functionally Graded Porous Structures through Finite Element Analysis. *Engineering Structures*, **165**, 287-301. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.023>
- [9] Lim, Y.H. (2003) Finite-Element Simulation of Closed Loop Vibration Control of a Smart Plate under Transient Loading. *Smart Materials and Structures*, **12**, Article No. 272. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/12/2/316>
- [10] Karagülle, H., Malgaca, L. and Öktem, H.F. (2004) Analysis of Active Vibration Control in Smart Structures by ANSYS. *Smart materials and Structures*, **13**, Article No. 661. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/4/003>