

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

國科會專題計畫成果報告撰寫格式說明

Preparation of NSC Project Reports

計畫編號：NSC 87-2213-E-002-076

執行期限：86年8月1日至87年7月31日

主持人：宋家驥 執行機構及單位名稱：台大造船及海洋工程

一、中文摘要

本文應用有限元素法 (finite element method) 計算模擬壓電換能器之結構振動特性，探討壓電陣元幾何尺寸之寬高比比值對機電耦合係數 (coupling coefficient) 的影響及不同尺寸、材質之背膠層與匹配層對換能器振動特性的改變。且在與參考文獻的比較下得知，本文不但提供了方便、精確的方式，另外藉由計算模擬的結果，可預知在實作換能器時將具有之效能，進而有效的節省了換能器研發的時間與經費。

關鍵詞：壓電換能器、寬高比、機電耦合係數

Abstract

The standard process of finite element analysis to characterize the structural vibration properties for the piezoelectric transducers is developed in this thesis. The coupling coefficient k corresponds to different width-to-thickness ratio is presented. The good agreement with the simulation results from the previous researches and the experimental results performed in this thesis shows that the electro-mechanical characteristics for the piezoelectric transducers can be predicted before it has actually manufactured. This, consequently, can not only save the time of development but also the cost of transducers.

Keywords: Piezoelectric Transducers, Coupl-

ing Coefficient,

二、緣由與目的

壓電陶瓷材料在壓電-機械 (electro-mechanical) 之感應器 (sensors) 制動器 (actuators) 的應用相當廣泛，諸如電話話筒聲音的接收 (傳送) 裝置、機械人的感應器、噴墨印表機噴嘴的油墨量控制器、醫療成像 (medical image) 及非壞檢測 (NDE) 之超音波換能器等。實際上過去壓電-聲場 (piezo-acoustic) 換能器是以嘗試錯誤法 (trial and error) 來研發產品，這不但耗時而且昂貴。然而以計算機來計算模擬與設計壓電換能器，則可事先預測該換能器之特性，並對其作最佳化，甚至進一步瞭解換能器聲波傳遞、輻射情形及發展新的材質作為設計的依據。

H. Allik[1]在1970年提出以有限元素法來計算振動行為之步驟，並建立一個四面體座標 (tetrahedron coordinates) 將壓電結構之電位自由度表示成類似於一般彈性結構的模式，進而可依據標準的有限元素法分析步驟解決三維的壓電-彈性 (electroelasticity) 問題。

H. A. Kunkel[2]及 N. Guo[3]討論壓電陶瓷 (PZT-5H 與 PZT-5A) 圓盤在不同的直徑厚度比下的共振情形，且針對共振模態的形態 (mode shape) 歸納出六種特性：徑向 (radial)、邊緣 (edge)、厚度剪切 (thickness shear)、厚度延伸 (thickness extensional)、長度延展 (length expander) 與高頻徑向 (high frequency radial) 模態，另外也討論各個共振模態之機電耦合係數

隨直徑厚度比改變時之變異，而決定圓盤直徑厚度比為 0.6 時為最佳設計比例。D. Boucher[4]、R. Lerch[5]討論壓電換能器在不同幾何尺寸下之共振特性，J. Sato[6]與 P. Challande[7]討論超音波診斷系統用之換能器，其寬高比與機電耦合係數的關係，同樣也得到寬高比為 0.6 時，換能器能量轉換的效應最佳。

由此可知，有限元素法應用在分析壓電換能器之振動問題下，已相當地成熟、方便，本文之目的即是希望利用 ANSYS® 軟體來分析壓電換能器。

三、結果與討論

我們選擇 PZT5A 之壓電陶瓷作為以下的分析。(材料的各項參數如附錄所示)類似於 R. Lerch[5]的模型，醫療用之超音波壓電換能器較多採用此幾何形狀之壓電片作為發射與接收訊號的最小單元，進而依據影像成形之設計要求，組合成為陣元 (array) 驅動。由於機械耦合係數為壓電換能器的重要指標之一，故以下首先探討在不同的寬高比下機械耦合係數的變化。假設壓電片單元之長軸遠大於寬、高軸(R. Lerch 認為長度大於十倍的寬(高)時，二維與三維模型計算結果，彼此誤差小於百分之一)下，我們採用 PZT5A，幾何形狀如圖 1 所示。圖 2 表示寬高比為 0.1 至 2.0 之壓電片(厚度固定為 0.4mm)前三個活塞式運動之共振(反共振)頻率，圖 3 為前三個模態之機械耦合係數在不同寬高比下的變化。並可由圖 4(第一個模態)得到機電耦合係數在寬高比為 0.6 時有極大值 0.67，同時也瞭解當寬高比大於 1.2 後，機電耦合係數變異不到百分之一。故為了得到較好的機電能量轉換，因此建議採用之寬高比大小為 1/3~2/3。圖 5 為第一個厚度模態共振時之模態形狀。圖 6 為第一個厚度模態反共振時之模態形狀。圖 7 為輸入阻抗之頻率響應函數圖。圖 8 為換能器單一陣元表面中心位置厚度方向位移之頻率響應函數。

接著我們以阻抗分析儀 (HP4192A)

實際量測之壓電片(材質為 PZT5A)，幾何尺寸如圖 9 所示，並以掃頻的方式量測頻率在 1kHz~6MHz 下壓電片之電氣阻抗響應圖，而試體量測與計算模擬之結果比較如圖 10(假設壓電片之阻尼係數為 0.013)。由圖 10 得知，計算的結果與測量相當吻合，但其中有些模態在計算模擬中並未顯示出來，原因是因為我們的計算模型經過簡化(僅以實體尺寸的四分之一做計算)，及有限元素模型的網格(mesh)不夠密所致。其次，壓電片各項材料參數與阻尼係數之決定也有很大之影響。

四、計畫成果自評

本文以有限元素法的分析，模擬各種基本幾何形狀之壓電片在電壓訊號激發下的振動特性，而計算結果在與參考文獻及實體試驗之比較下無論是在共(反)振頻率模態、機電耦合係數、電氣輸入阻抗與位移響應函數等等之分析，均能得到適當、合理之驗證結果。我們也得知壓電片之尺寸在不同寬高比下，其以第一個厚度模態共振時之機電耦合係數與模態垂直位移均較其餘之厚度模態共振時大，並且在寬高比為 0.6 時有極大值。

藉由本文之計算結果的驗證，相信增加不少以 ANSYS 來模擬此類問題的可信度。總括來說，本文以計算機來模擬壓電換能器有下列幾點問題仍待克服：

(1)由於 ANSYS 版本的限制，可用之元素節點數有限，而且當所取之節點數越多其所耗費的計算時間相對地提高，如此除了較難判斷程式之收斂性外，計算結果之誤差也不易控制。

(2)為了減少計算量而採用之簡化模型，雖然得到頗為合理之結果，但此方法之適用性仍需檢討，譬如該取何種尺寸之簡化模型足以代表整個構件之振動特性，

而同時又節省計算之時間。

(3)計算模擬用之壓電片材料參數乃參考一般之數值，其與我們實測之試體間的差異，亦是造成計算結果誤差的來源之一，因此必須先確定材料之各項參數是否適當，以便作為分析時之依據。

五. 參考文獻

[1]H. Allik and Thomas J. R. Hughes, 1970, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol.2, pp.151-157, Finite element method for piezoelectric vibration.

[2]H. A. Kunkel, S. Locke and B. Pike-roen, 1990, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol.37, No. 4, pp.316-327, Finite element analysis of vibrational modes in piezoelectric ceramic disks.

[3]N. Guo, P. Cawley and D. Hitchings, 1992, *Journal of Sound and Vibration*, vol.159, No.1, pp.115-138, The finite element analysis of the vibration characteristics of piezoelectric discs.

[4]D. Boucher, M. Lagier and C. Maerfeld, 1981, *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, vol.SU-28, No.5, pp.318-330, Computation of the vibrational modes for piezoelectric array transducers using a mixed finite element-perturbation method.

[5]R. Lerch, 1990, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency control*, vol.37, No.2, pp.233-246, Simulation of piezoelectric devices by two- and tree-dimensional finite elements.

[6]J. Sato, M. Kawabuchi and A. Fukumoto, 1979, *Journal of Acoustical Society of America*, pp.1609-1611, Dependence of the electro-mechanical coupling coefficient on the width-to-thickness ratio of plank-shaped piezoelectric transducers used for electronically scanned ultrasound diagnostic systems.

[7]P. Challande, 1990, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency control*, vol.37, No.2, pp.135-140, Optimizing ultrasonic transducers based on piezoelectric composites using a

finite-element method.

六. 附錄

PZT 5A 材料參數：

Density : 7750 kg/m³

Elastic constant :

$$c^E = \begin{bmatrix} 12.1 & 7.54 & 7.52 & 0 & 0 & 0 \\ & 12.1 & 7.52 & 0 & 0 & 0 \\ & & 11.1 & 0 & 0 & 0 \\ \text{symm.} & & & 2.11 & 0 & 0 \\ & & & & 2.11 & 0 \\ & & & & & 2.26 \end{bmatrix} \times 10^{10} \text{ N/m}$$

Piezoelectric constant :

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 12.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 12.3 & 0 & 0 \\ -5.4 & -5.4 & 15.8 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ A}_s/\text{m}$$

Dielectric constant :

$$\epsilon^S = \begin{bmatrix} 8.1066 & 0 & 0 \\ 0 & 8.1066 & 0 \\ 0 & 0 & 7.3455 \end{bmatrix} \times 10^{-9} \text{ A}_s/\text{V}_n \text{ Electrodes}$$

七. 圖列

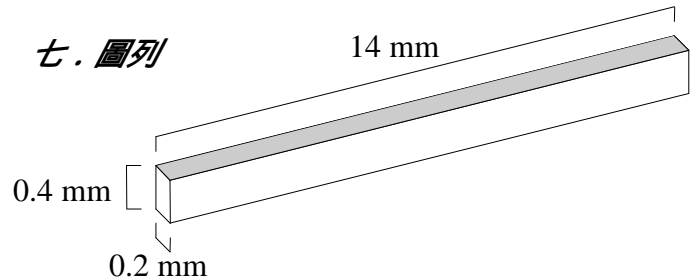


圖 1. 壓電細長板模型，壓電片表面(上、下)全部電極。

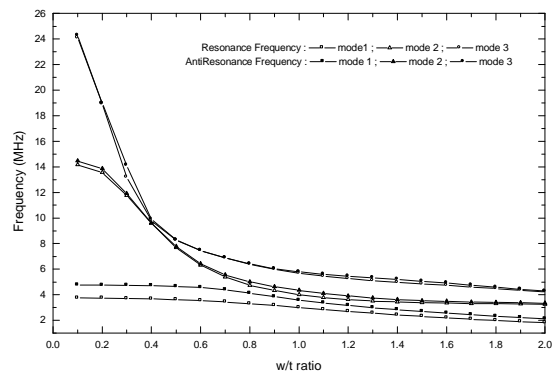


圖 2. 前三個模態之共振(反共振)頻率。

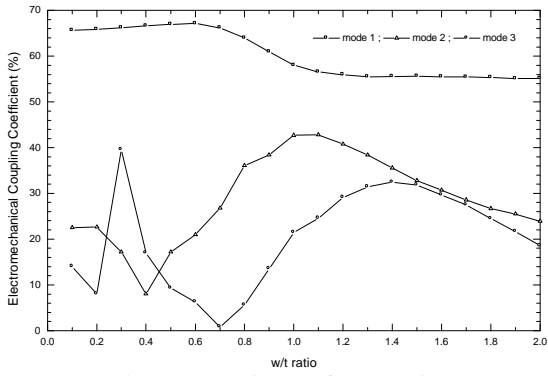


圖 3.前三個模態之機電耦合係數。

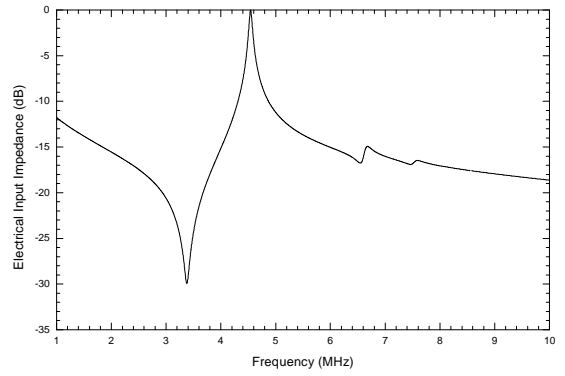


圖 7.電氣輸入阻抗頻率響應函數 (振幅)。

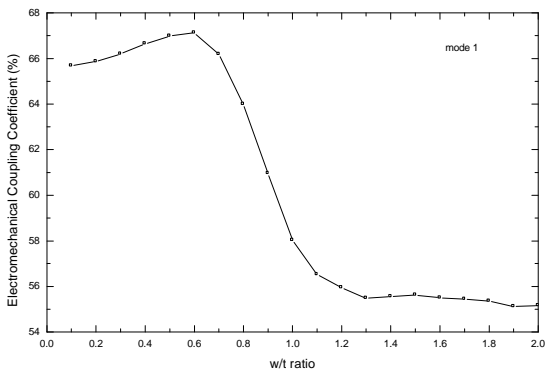


圖 4.第一個模態之機電耦合係數。

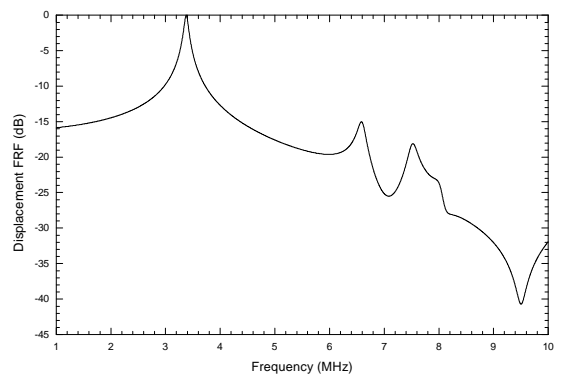


圖 8.壓電陣元表面中心點垂直位移之頻率響應函數 (振幅)。

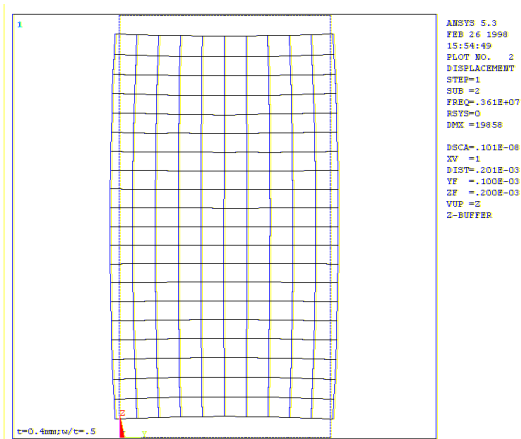


圖 5.第一個厚度模態共振之模態形狀。

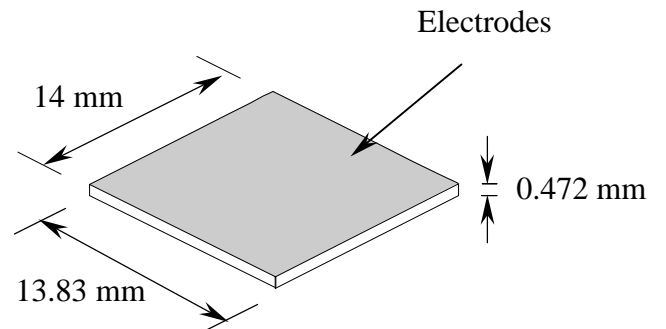


圖 9.方形平版之壓電片 (壓電片表面 (上、下) 全部電極)。

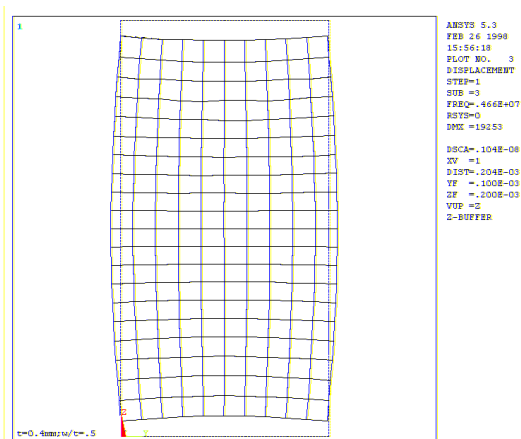


圖 6. 第一個厚度模態反共振之模態形狀。4

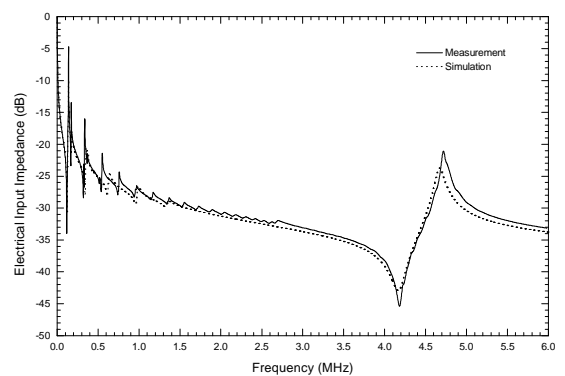


圖 10.壓電片量測與計算模擬之電氣輸入阻抗頻率響應圖 (振幅)。