

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

光纖光柵超音波感測器響應之研究與在複材層板非破壞評估上的應用

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2212-E-009-029-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立交通大學機械工程學系

計畫主持人：尹慶中

計畫參與人員：李雨青、劉育翔

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 10 月 31 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

光纖光柵超音波感測器響應之研究與在複材層板非破壞評估上的應用

Response of a fiber grating ultrasonic sensor and its application in nondestructive evaluation of composite laminates

計畫編號：NSC 91-2212-E-009-029

執行期限：91 年 8 月 1 日至 92 年 7 月 31 日

主持人：尹慶中 國立交通大學機械工程學系

計畫參與人員：李雨青、劉育翔 國立交通大學機械系

摘要

本研究結合光纖光柵感測原理與技術、板波波傳原理及二維快速傅立葉轉換，分析光纖光柵量測板波波傳的頻散特性，驗證光纖光柵具有寬頻偵測頻散板波波傳的能力。光纖光柵除了黏置於鋁板表面，並內埋於正交排列之複材層板，作為板波感測器。實驗分析得知光柵偵測板波的頻寬與板波波長在光柵上的投影量、光柵的軸向與橫向應變、不等臂 MZ 光纖干涉儀之光臂差及光柵長度有關。

關鍵詞：光纖布拉格光柵、超音波感測器、板波相速度

ABSTRACT

This research establishes a fiber grating system as well as analyzes its response in measurement of dispersive plate waves using fiber grating sensing principle, laser-induced ultrasound technique, and two-dimensional fast Fourier transform method. The fiber gratings are attached on an aluminum plate and embedded in a fiber-reinforced carbon/epoxy composite cross-ply to detect plate waves launched from various orientations. Phase velocity of the plate waves measured by the fiber gratings are in a good agreement with the prediction using the first order shear deformation plate theory in a broad frequency range. Experimental and analytic results evidence that the bandwidth of fiber grating system depends on the wavelength projection of plate waves on the grating, axial and transverse strains on the grating, optical path difference of the unbalanced Mach-Zehnder interferometer, and grating length.

Keywords: Fiber Bragg Grating, Acousto-Ultrasonic Sensor, Phase Velocities of Plate Waves

一、前言

光纖具有體積小、質量輕、絕緣性、高頻寬、低損耗以及不受電磁干擾等多項優點，在非破壞評估與結構健康監測上極具應用性。其主要工作原理為藉光纖內光傳輸特性，如相位、強度、波長、時間及偏極方向等的改變，來偵測物理場的變化。光纖感測系統包含光纖感測器、解調裝置、光接收器等，再以電路或電腦程式分析量測之資訊。

光纖光柵不僅具有偵測溫度及靜態應變的能力，亦具備偵測振動及波動的動態應變之能力。傳統的壓電式超音波感測器僅能測量到試體表面粒子的面外運動速率，表面粘著或內埋於結構之光纖感測器不僅可以偵測面外的超音波振動訊號，還能偵測結構面內

動態應變或變位。經由適當安排，光纖光柵超音波感測器可以靈敏地偵測板殼結構的撓性波(flexural waves)及延性波(extensional waves)及橫向剪力波(SH waves)的波傳。

超音波光纖感測器的早期研究多集中於 fiber optic Fabry-Perot (FOFP), 如 Alcoz et al [1]、Dorigi et al [2-3]。在超音波感測方面，則以 MZ 光纖干涉儀的一個支臂作為感測光路，如 Pierce 及 Culshaw [4]、Gachhagan et al [5]。直到光纖光柵問世，因為具備定址多工的特性，可以配合光纖通訊技術，遂成為光纖感測器的主流。光纖光柵的研究先是應用於偵測結構溫度及靜態負荷之應變[6-7]，進而應用於量測結構振動或動態應變，如 Kersey et al [8-9]、Beadle 及 Weis [10]，但是其量測頻寬受限於光柵長度，先前的研究文獻僅達到 100 kHz 左右。Betz et al [11]以可調式雷射及 chirped 光柵的量測板波動態訊號，雖然無法同步量測，但是適合定址多工的光柵感測應用。

光纖光柵的光譜分析是光纖元件設計的重要環節，Erdogan [12]曾回顧布拉格光柵的反射和穿透頻譜的計算方法。本研究將入射板波對於布拉格光柵的負荷假設為週期應變，產生 chirped 光柵效應，並應用該方法及傳遞矩陣法(transfer matrix method)計算反射光譜中心波長的移動。

Alleyne and Cawley [13]曾以二維快速傅立葉轉換獲得多模態板波頻散曲線，雖然分析的是數值模擬之板波訊號，但此方法已廣泛應用於頻散波相速度的實驗量測上。

二、光纖光柵偵測原理與實驗量測

圖 1 所示為本研究採用之光纖光柵感測系統，包含一個 ASE 寬頻光源、一組反射式光纖光柵、一組不等臂之 MZ 光纖干涉儀將光柵反射的光波長變化解調為相位差，最後以光接收器將光強變化轉換為電壓，構成一感測系統。實驗前，先將長度為 5 mm 及 2.5 mm 的光柵，黏置於 0.3mm 厚之 300×300mm 鋁板表面，並將相同規格之光柵埋入 0.6mm 厚的正交排列之 T300/2500 碳纖環氧樹脂複材層板[0/90]_s 的第一、二層之間，試片之光纖光柵反射光譜如圖 2 所示。當光纖光柵受到板波動態應變作用，造成光柵間距改變($\Delta\Lambda$)，使光纖光柵反射光波的波長偏移($\Delta\lambda$)。ASE 光源係以 980nm 雷射激發摻鉍光纖，產生寬頻光源，摻鉍光纖對光源品質的影響相當重要。

不等臂之 MZ 光纖干涉儀作為光波波長的解調器，干涉後之光強度訊號如下：

$$I(t) = A \{1 + K \cos[\psi(\Delta\lambda) + \phi_r]\} \quad (1)$$

此處， A 、 K 為 MZ 光纖干涉儀兩端光纖耦合器分光比的函數，相位 $\psi(\Delta\lambda)$ 為

$$\psi(\Delta\lambda) \cong \frac{2\pi n d}{\lambda^2} \Delta\lambda(t) \cong \frac{2\pi n d}{\lambda^2} k_\epsilon \Delta\epsilon(t) \quad (2)$$

若忽略橫向應變對於光柵布拉格波長的影響，光柵布拉格波長的變化量與光纖因板波入射引致之軸向動態應變成正比， $\Delta\lambda(t) \cong k_\epsilon \Delta\epsilon(t)$ 。光強度訊號輸出至光接收器，反映出超音波對於光纖光柵照射所引致的動態應變。量測超音波響應時，必須保持 MZ 光纖干涉儀的相位差在 $\pm 90^\circ$ (quadrature) 相位點附近運作，其響應呈現比較良好的線性變化。MZ 光纖干涉儀對於環境的變化靈敏，環境振動或溫度擾動都會使其相位偏移。本研究採用被動式減振，防範氣流及溫度干擾，避免引入較大的量測誤差。以 LabVIEW 撰寫一圖控軟體，透過 A/D、GPIB 等介面卡完成一套自動化量測系統。

實驗量測以脈衝雷射點聚焦於試片表面，產生寬頻的暫態板波。圖 3 所示為光纖光柵與寬頻之錐形(conical)壓電探頭感測雷射生成板波訊號之比較，波源與感測器之場距皆為 35 mm。為了驗證實驗所量測之動態訊號是雷射生成板波，而非一般的環境擾動或平板試片的振動訊號，本研究先以光柵之中心為圓心，沿著徑向移動雷射超音波波源，

進行雷射超音波訊號的線掃描，並以光柵量測板波響應，定性觀察板波的波傳訊號。圖 4 所示為光纖光柵與錐形探頭感測的雷射生成板波訊號之線掃描灰階圖比較，當波傳場距增加時，板波訊號抵達的時間逐漸延遲，時間延遲與波傳距離呈非線性變化，此與板波為頻散波之特性相符。最後，本研究應用二維快速傅立葉轉換技術[13]，定量計算板波的相速度頻散曲線。

三、結果與討論

圖 5 所示為光纖光柵與錐形探頭感測的鋁板板波相速度比較，錐形探頭的頻寬超過 1 MHz，而 5 mm 光柵偵測 0° 方向入射板波的頻寬僅約為 300 kHz。若板波入射於光柵之角度為 45° ，感測頻寬則增加至 750 kHz，如圖 6 所示。與過去相關文獻比較，光纖光柵的頻率響應一般僅能達到 100 kHz 左右，本研究獲致較寬的頻率響應，顯示應用光柵感測器於結構健康監測或板波非破壞評估的研究是可行的。

圖 7 所示為將光柵內埋於 $[0/90]_s$ 複材層板偵測 0° 與 90° 入射之 A_0 板波相速度，當與相關理論值比較，發現不論光柵長度為 2.5 mm 或 5 mm，實驗值與理論值都很接近，但卻仍留有一段偏差。此可能與光纖埋入複材層板時發生滑移，因而發生光柵與波傳方向的夾角不如預期所致，理論值可以作為實驗值分佈的上下限。

本研究根據 Erdogan [12]描述的光纖模態耦合理論計算布拉格光纖光柵受到超音波週期性應變負荷的反射光頻譜變化，探討不同波長的超音波對於光柵反射光波長改變的影響[14]。板波入射於光柵的夾角 θ (參考圖 1 所示)愈大，光柵感測板波訊號的頻寬就愈寬。若入射板波的波長為 λ ，則繞射進入光纖光柵的彈性波波長為 $\lambda/\cos\theta$ ，彈性波波長與光柵長度 λ 的比值 $\lambda/(\lambda\cos\theta)$ 與光柵偵測板波的頻寬相關。圖 8 所示即為板波入射光柵，不同入射角所引致的布拉格波長的變化。入射角愈大，布拉格波長的改變量就愈大，布拉格波長的最大偏移量隨 $\lambda/(\lambda\cos\theta)$ 增大，趨於 $0.06\text{ nm}/50\mu\epsilon$ ，即 $1.2\text{ pm}/\mu\epsilon$ 。由於布拉格波長的偏移量增加，以致於訊噪比(S/N ratio)降低，光柵感測頻寬增加。

四、結論與展望

本研究建立一套完整的光纖光柵超音波感測系統，採用 ASE 寬頻光源入射於光纖光柵，光柵的反射光譜受到板波的動態應變影響而偏移，以不等臂之 MZ 光纖干涉儀解調反射光波波長變量，再以光接收器將光強訊號轉變為電壓訊號。光柵感測器除了黏置於鋁板表面，並埋於複材層板內進行量測。本文採用雷射超音波技術，在鋁板及複材板上生成寬頻之頻散板波，並以二維快速傅立葉轉換方法分析光纖光柵感測板波的能力及特性，實驗值與板波相速度理論曲線相當吻合，實驗結果證實光纖光柵具有寬頻偵測頻散板波訊號的能力。

歸納直接影響光柵偵測板波的能力及頻寬的因素為(1)繞射進入光柵之彈性波波長、(2)板波在光柵上的軸向與橫向應變、(3)MZ 光纖干涉儀之光臂差、(4)光柵長度。當板波波長投影量與光柵的比值越大時，所得到的最大中心波長偏移量越高。由實驗結果得知，垂直入射所造成的板波訊號振幅比平行入射板波訊號振幅小，因此板波對光柵造成的軸向應變大於橫向應變。MZ 光纖干涉儀的光臂差為影響線性區域的大小，也影響光柵落在線性區域的位置，當光臂差越小，使干涉條紋中的線性區域變大，但板波訊號放大能力降低，對於量測能量較小的高頻板波，仍有待進一步研究。

未來將光柵埋入複材層板的製作可以(1)將光柵放入經割開的複材纖維再與其他預浸布進行堆疊、(2)將光柵固定於與環氧樹脂耦合良好的軟性膠片，如 Kapton®，再進行

壓製，以確保光柵在埋入時，避免位置發生偏移。

發展構造簡單、解析度高及穩定性良好之感測系統是研究光纖光柵偵測超音波響應的基礎，未來宜持續發展結構健康監測或板波非破壞評估之光纖感測系統。

參考文獻

1. J. J. Alcoz, C. E. Lee, and H. F. Taylor (1990), "Embedded fiber-optic Fabry-Perot ultrasound sensor," *IEEE Transaction on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **37**(4), 302-306.
2. J. F. Dorigi, S. Krishnaswamy, and J. D. Achenbach (1995), "Stabilization of an embedded fiber optic Fabry-Perot sensor for ultrasound detection," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **42**(5), 820-824.
3. J. Dorigi, S. Krishnaswamy, J. D. Achenbach (1997), "Response of an embedded fiber optic ultrasound sensor," *J. Acoust. Soc. Am.*, **101**(1), 257-263.
4. S. G. Pierce, B. Culshaw (1998), "Laser generation of ultrasonic Lamb wave using low power optical source," *IEEE Proc., Sci. Meas. Technol.*, **145**(5), 244-249.
5. A. Gachhagan, G. Hayward, A. McNab, P. Reynolds, S. G. Pierce, W. R. Philp, and B. Culshaw (1999), "Generation and reception of ultrasonic guided wave in composite plates using conformable piezoelectric transmitters and optical-fiber detectors," *IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **46**(1), 72-81.
6. P. Ferraro and G. D. Natale (2002), "On the possible use of optical fiber Bragg gratings as strain sensors for geodynamical monitoring," *Optics and Lasers in Engineering*, **37**, 115-130.
7. R. Jones and S. Galea (2002), "Health monitoring of composite repairs and joints using optical fibers," *Composite Structures*, **58**, 397-403.
8. A. D. Kersey, T. A. Berkoff and W. W. Morey (1992), "High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection," *Electronics Letters*, **28**(3), 236-238.
9. A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Partick, M. LeBlane, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele (1997), "Fiber grating sensors," *Journal of Lightwave Technology*, **15**(8), 1422-1463.
10. B. M. Beadle and R. S. Weis (1998), "Longitudinal vibration of a silica fiber segment characterized using a fiber Bragg grating," *IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **45**(5), 1100-1104
11. D. C. Betz, G. Thursby, B. Clushaw and W. J. Staszewski (2003), "Acousto-ultrasonic sensing using fiber Bragg gratings," *Smart Materials and Structures*, **12**, 122-128.
12. T. Erdogan (1997), "Fiber grating spectra," *Journal of Lightwave Technology*, **15**(8), 1277-1294.
13. D. Alleyne and P. Cawley (1991), "A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals," *J. Acoust. Soc. Am.*, **83**(3), 1159-1168
14. 李雨青(2003), 光纖光柵在板波波傳量測上的應用, 國立交通大學機械系碩士論文, 臺灣, 新竹。

附圖

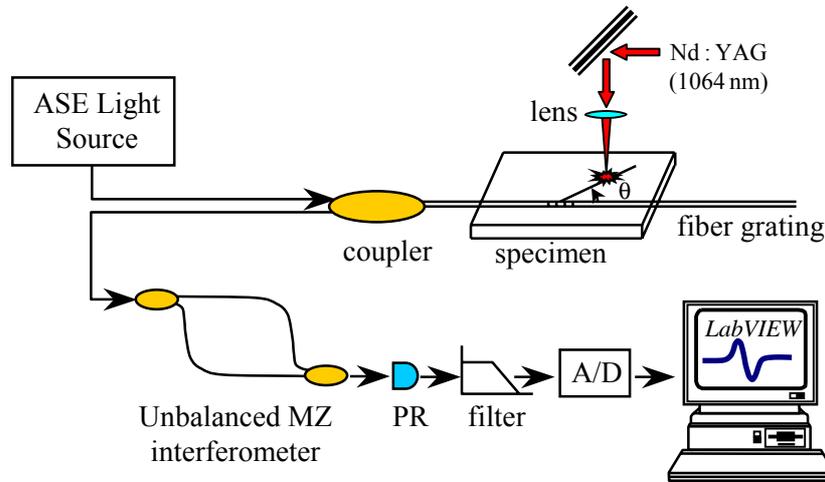


圖 1 光纖光柵超音波感測系統及雷射超音波實驗示意圖

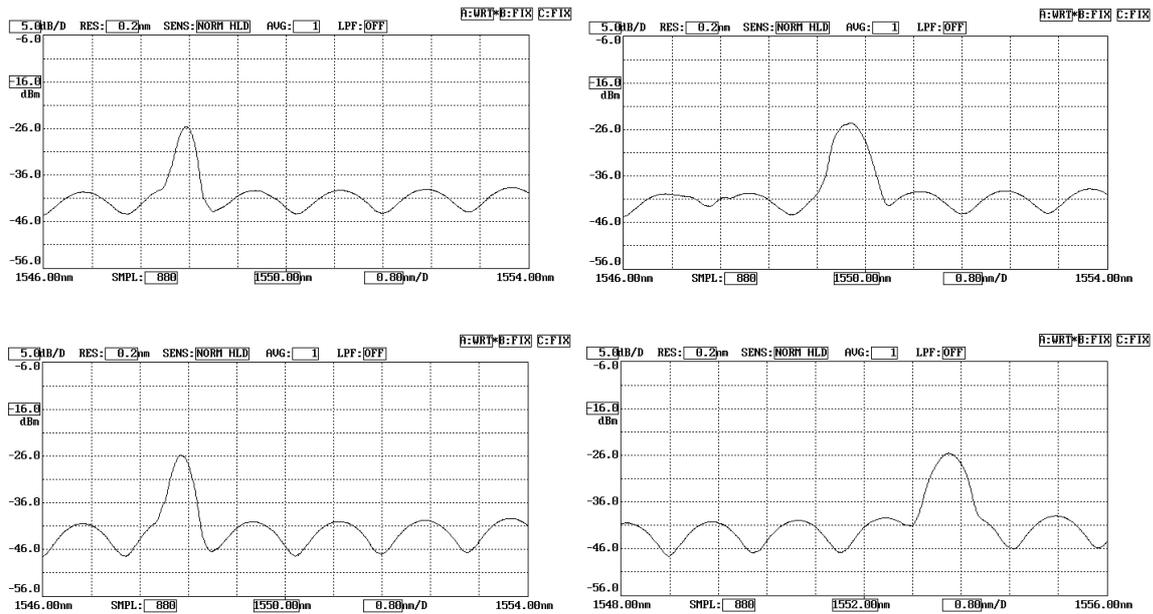


圖 2 (左上) 5 mm、(右上) 2.5 mm 光柵黏置於鋁板及(左下) 5 mm、(右下) 2.5 mm 光柵內埋於複材層板的光柵反射光經過 MZ 光纖干涉儀後之量測光譜。

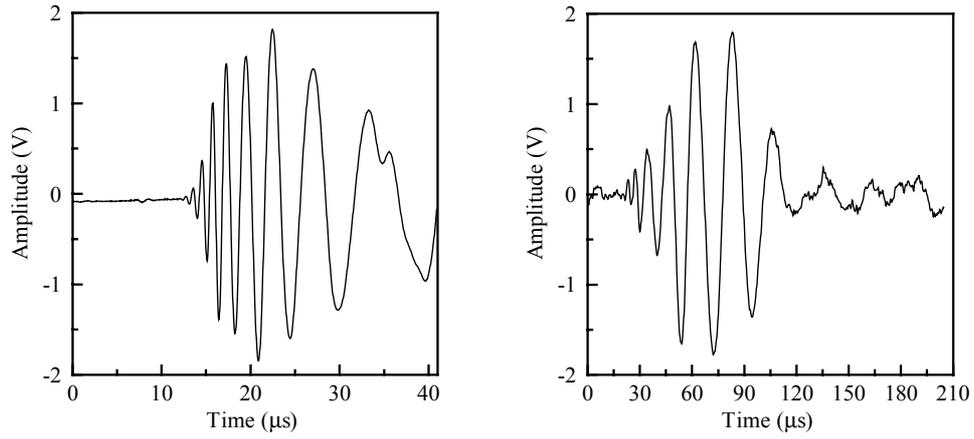


圖 3 (左)錐形探頭、(右) 5 mm 長光柵感測鉛板上之雷射生成板波訊號。

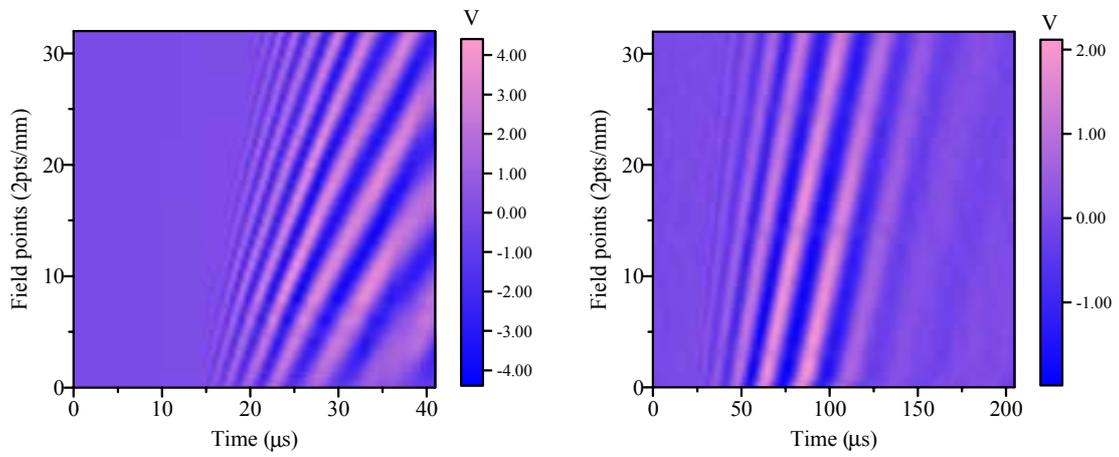


圖 4 (左)錐形探頭、(右) 5 mm 長光柵感測鉛板上之雷射生成板波訊號灰階圖。

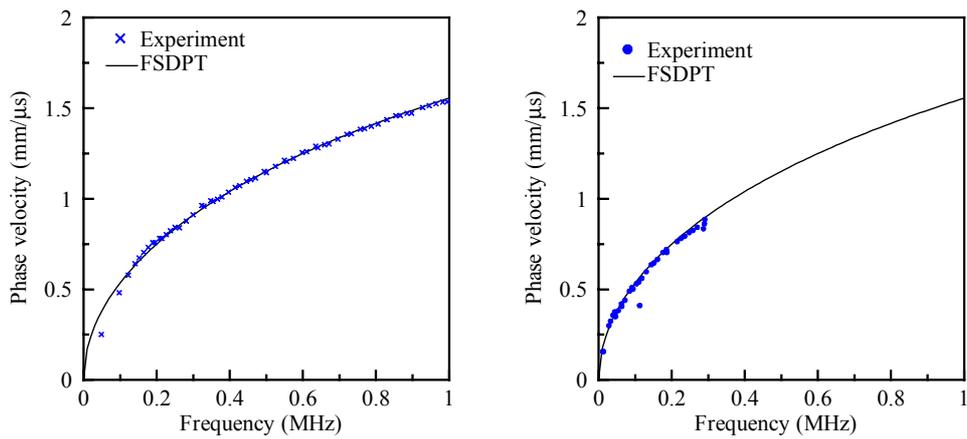


圖 5 (左)錐形探頭、(右) 5 mm 長光柵感測鉛板之 A_0 板波相速度頻散曲線。

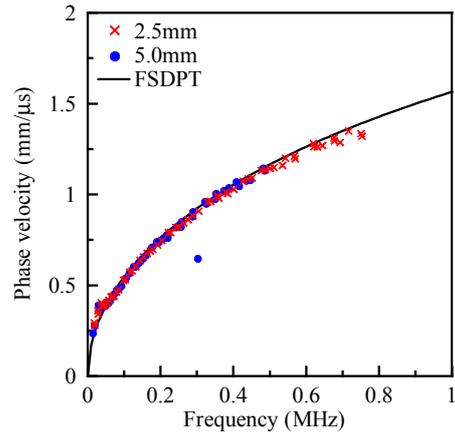


圖 6 光柵感測鋁板 45° 方向入射之 A_0 板波相速度與頻散曲線理論值。

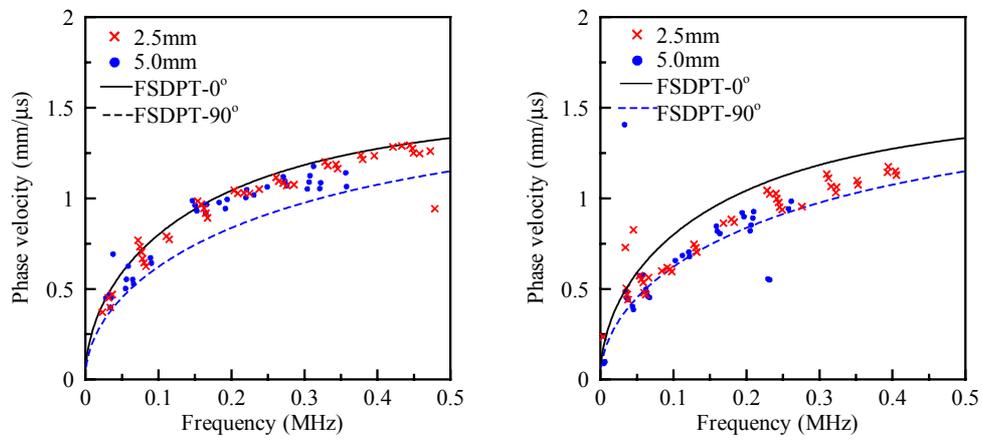


圖 7 (左)平行、(右)垂直光柵軸入射之 A_0 板波相速度與頻散曲線理論值。

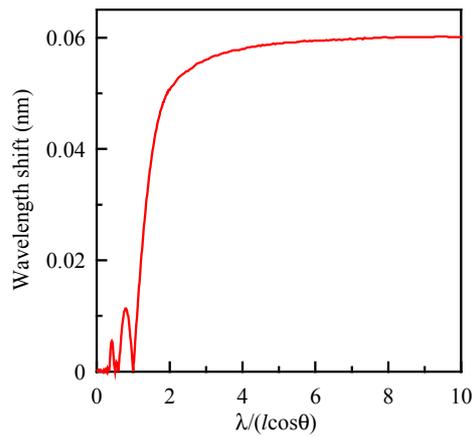


圖 8 光柵布拉格波長改變量相對於聲波入射角、波長與光柵長度的關係圖。