

# 利用環境雜訊為相位調制之電子影像光斑干涉術

## The Electronic Speckle Pattern Interferometry Method with Phase Moduled by Environmental Noise

黃吉宏、王偉中、徐宗偉

Chi-Hung Hwang, Wei-Chung Wang, Tzong-Wei Hsu

電子影像光斑干涉術應用於物體振動測定時，低頻自然環境雜訊阻隔不易。為使電子影像光斑干涉術能更符合產業振動量測需求，本文將背景雜訊影響視為相位調制驅動力，並分別作用於光學系統與待測物上，將不同時刻承受相同表徵推力之影像經簡單影像相減，即可獲得影像條紋密度為傳統電子光斑影像振動量測方式的兩倍、條紋對比與穩定度亦更佳的一種振動量測方法。本文同時討論不同背景雜訊下干涉條紋計算振動位移及誤差分析方式。

It is not easy to prevent environmental noise while measuring object vibration by electronic speckle pattern interferometry. To meet the industrial requirement on vibration measurement, in this paper, environmental noise is re-investigated to establish a new ESPI method. In this paper, the environmental noise is treated as phase modulation driving force and applied both on the measuring object and optical system. Two images with the same nominal driving force but grabbed at different time are subtracted and then clearer, more stable and double denser fringe pattern than traditional ESPI pattern is obtained. Finally, the ways to analyze fringe pattern and associated errors have also been discussed.

### 一、前言

電子影像光斑干涉術 (electronic speckle pattern interferometry, ESPI) 由 Leendertz<sup>(1)</sup> 於 1970 年首先提出，為一簡便且高精確的光學量測方法。此一量測方法之優點為全域性、非接觸且具有與全像術同樣之量測靈敏度，同時避免全像術中必需的化學沖洗、三維位移量分離與量測影像儲存等問題。

ESPI 位移量測範圍為 5–100  $\mu\text{m}$ <sup>(2)</sup>，廣泛地被運用在非破裂檢測<sup>(3)</sup>、位移變形量測<sup>(4)</sup> 及振動量測<sup>(5)</sup> 等工程與研究範疇之中。1971 年 Butters 與 Leendertz<sup>(6)</sup> 以 ESPI 量測圓盤振動，惟分析方式並未加以討論。1976 年 Løkberg 與 Høgmøen<sup>(5)</sup> 以 ESPI 結合均時法量測物體振動，並以零階貝式函數描述所獲得之 ESPI 干涉條紋影像，Høgmøen 與 Løkberg<sup>(7)</sup> 以物體振動頻率驅動反射鏡以增加 ESPI

干涉條紋量測之精度。1996 年 Wang 等人<sup>(8)</sup> 以均時法為基礎，考慮振動量測過程，所有的外來因素對於測試件的擾動與致振器的頻率為一致，且其效果集中於待測物體之上，待測物受外界因素造成振動振幅變化，並提出 AF ESPI，大幅改善了傳統 ESPI 條紋之清晰度及對位移之靈敏度。1997 年 Wong 等人<sup>(9)</sup> 提出以 ESPI 均時法為基礎，以不同作用力之振動影像進行影像相減，藉以改善條紋之對比及靈敏度。

光學測量方法具有全域性、非接觸性及可遙測的優點，其中干涉法的量測精度極高且可以直接量測物體之位移，惟極易受到周圍環境因素干擾，干涉設備需架設在極佳的隔震設備上，以避免地面非量測振動因素干擾，且隨量測範圍的增加，空氣折射率的變化更對於量測結果有極大的影響，使得所獲得的干涉條紋影像經常可見到有扭曲與飄動的現象。以傳統干涉儀架構測定振動行為時，因所配合的影像擷取方法與設備的不同，可以分為三種基本的量測技術，分別為均時法 (time-averaged method)、閃頻法 (stroboscopic method) 與脈衝雷射 (pulse laser)<sup>(2)</sup> 法。基於實用性與設備成本因素，電子光斑影像干涉術大多採用均時法為基本架構；惟採均時法量測振動時，環境影響也將隨著 CCD 曝光時間而累積至所獲得之干涉條紋影像中。本文將重新審視環境雜訊對於振動量測之影響，並據以建立新的 ESPI 量測與干涉條紋分析方法。

## 二、基本量測原理

本文為討論方便之考量，所討論電子光斑影像干涉術架構如圖 1 所示，為雙光路干涉儀架構，主要為測量未經拋光處理的物體表面振動時平面外之位移量。根據一般光學干涉原理，可推得光學系統在某一時刻  $t$  於 CCD 上可紀錄之光強度可表為：

$$I(x,y,t) = I_0 + I_r + 2\sqrt{I_0 I_r} \cos[\varphi(x,y) + \Delta(x,y,t)] \quad (1)$$

其中  $I_0$  為物光 (OL) 光強， $I_r$  為參考光 (RL) 光強， $\varphi(x,y)$  為 OL 與 RL 在空間中每一點因表面粗糙與空間幾何所造成的相位差。若待測物處於共振狀態

時，則待測物變形或運動所造成物光與參考光間的相位差  $\Delta(x,y,t)$  可表為下式

$$\Delta(x,y,t) = \frac{4\pi(1 + \cos\theta)(A \cos \omega t)}{\lambda}$$

其中  $\lambda$  為雷射光波長， $A$  為試片之振幅， $\omega$  為振動頻率。

基於產業實用性與設備成本因素，電子光斑影像干涉量測系統應用於振動測量時大多採用均時法。惟 Wang 等人<sup>(8)</sup> 建議採用均時法時，CCD 紀錄影像的時間  $T$  應為物體振動週期整數倍，以避免分析上之誤差；故 CCD 所記錄之光強  $I_T$  表為：

$$I_T = T(I_0 + I_r + 2\sqrt{I_0 I_r} J_0)(\kappa(1 + \cos\theta)A \cos \varphi) \quad (2)$$

其中  $J_0$  為零階貝式函數 (zero-order Bessel function)； $\kappa = 2\pi/\lambda$  為波數 (wave number)。由式 (2) 可知，所得影像條紋由零階貝式函數及  $\cos \varphi$  的乘積所主導，惟干涉條紋影像之可見度 (visibility) 仍受背景光強度  $I_T = T(I_0 + I_r)$  的影響。

若物體處於「完全」靜止狀況，即無任何光學等效之光程差， $\Delta(x,y,t) = 0$ ，則 CCD 所紀錄之光強度為  $(I_T)_s$ ：

$$(I_T)_s = T(I_0 + I_r + 2\sqrt{I_0 I_r} \cos \varphi) \quad (3)$$

由於式 (2) 中含有  $T(I_0 + I_r)$  背景光強項，因此干涉

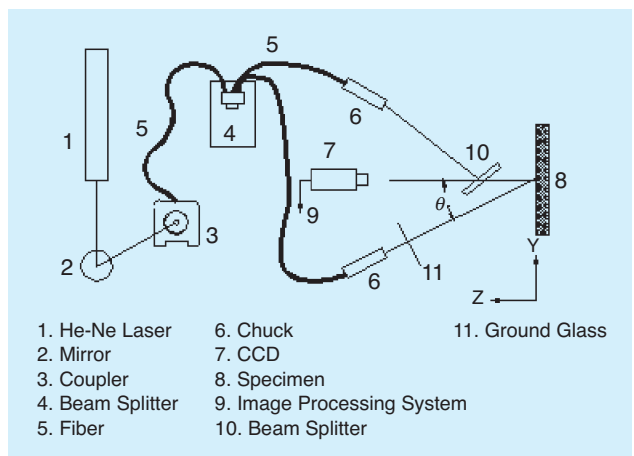


圖 1. ESPI 量測平面外振動之實驗架構。

條紋影像可見度較低。傳統上為增加干涉條紋影像之可見度，可將振動下所得之光斑干涉影像與「完全」靜止狀況下之光斑干涉影像進行影像相減，即為影像相減法 (image signal subtraction)。將式 (2) 及 (3) 相減以去除背景光強後，可得如下式：

$$(I_r)_s - I_r = 2T\sqrt{I_o I_r}(1 - J_0(2\kappa(1 + \cos\theta))\cos\varphi) \quad (4)$$

相減後之影像灰度值變化由  $(1 - J_0)$  與  $\cos\varphi$  的乘積所決定；由於  $\cos\varphi$  為空間高頻光斑訊息，因此干涉條紋位置由  $(1 - J_0)$  項之區域極值所決定。惟應用電子影像光斑干涉術或其他光學干涉方法量測時，量測精度極高，因此量測過程時對於環境背景干擾的控制極為重要，但經常卻僅能以不同的設備抑制干擾而極難完全阻隔，難以獲致一個完全靜止之參考影像。為瞭解環境雜訊對於電子影像光斑干涉術於振動量測時之影響，考慮量測時環境背景干擾效應可分為兩部分：第一部分為環境擾動力量作用於光學元件，其來源可為空氣擾動與地面振動等；第二部分為環境擾動由振動激振系統 (如致振器，shaker) 和待測物體對環境干擾之動態響應所造成。為便利後續討論，環境背景干擾對於光學系統與待測物之影響將分別以 EF1 及 EF2 稱之，並將環境雜訊因素 EF1 及 EF2 分別導入修正式 (1)，如下式所示：

$$I = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\varphi + \delta\varphi + \Delta') \quad (5)$$

其中  $\delta\varphi$  為背景環境干擾作用於光學元件上所造成相位改變，為 EF1 之效應； $\Delta'$  為待測物因致振器與環境干擾影響所造成之相位，為 EF2 效應。其中  $\Delta'$  包含表徵 (nominal) 振動條件所產生之振幅  $A(x, y, t)$ ，以及因振動推動設備與環境變化而產生  $\Delta A$  的平均振幅微小變動量。由於振動量測時，致振器輸出頻率通常為待測物之共振頻率，如環境背景雜訊之頻譜與共振頻率不同者，其影響相對較少。因此，考量環境背景雜訊對待測物影響時，僅考慮與待測物共振頻率相同者，則  $\Delta'$  可表為下式：

$$\Delta' = \frac{2\pi}{\lambda}(1 + \cos\theta)(A + \Delta A)\cos\omega t \quad (6)$$

另  $\delta\varphi$  則為作用於光學設備及元件之背景雜訊，此雜訊來源為低頻環境振動或空氣流動或空氣折射率不均或變化所造成，其頻率遠較待測共振頻率為低，此外，高頻部分之微小環境擾動較容易阻隔，是以高頻雜訊傳遞至光學元件的能量可被忽略，因此本文假設作用於光學系統上因環境雜訊所導致之相位變化為一線性關係，並可表示如下：

$$\delta\varphi = \varphi_1 + \beta t \quad (7)$$

其中  $\varphi_1$  為測量開始之起始相位與背景環境干擾所形成相位差， $\beta t$  則描述量測過程環境對光學系統擾動而引入新的相位變化。上述假設係將環境干擾因素以相位變化方式引入式 (1)，因此環境雜訊相當於相位調制之驅動力。將式 (6) 及式 (7) 代入式 (5)，且即可解得取像時之影像可表為

$$I = T\left[I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\varphi + \varphi_1)J_0(M)\right] \quad (8)$$

其中

$$M = \frac{2\pi}{\lambda}(1 + \cos\theta)(A + \Delta A) \quad (9)$$

$M$  為一包含光路設定與表徵振動振幅參數函數值，因此以核心值 (kernel value, KV) 稱之。式 (8) 為背景環境干擾作用下測定待測物振動時 CCD 所紀錄之光強度。

將處於相同表徵振動條件下之不同時刻所紀錄之振動影像以影像相減處理，可獲得干涉條紋影像，所得影像灰度值  $B$  與表徵振幅具下列之關係：

$$B \propto \left| \sin(\varphi + \varphi_1)\delta\varphi J_0(M) - \cos(\varphi + \varphi_1)\delta M J_1(M) \right| \quad (10)$$

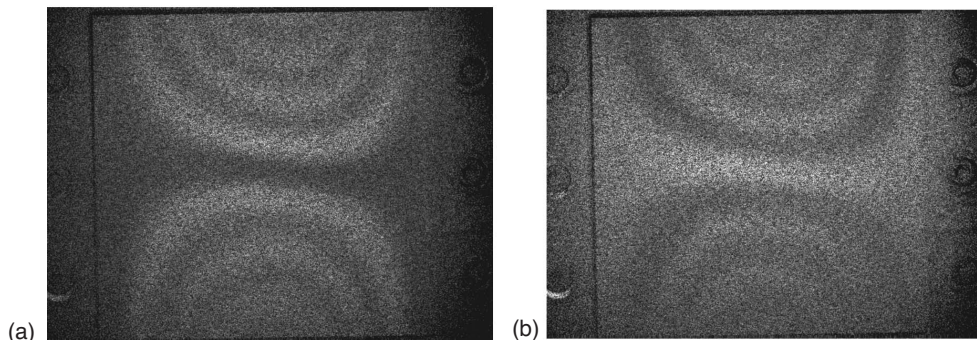
$$= \sqrt{[\delta\varphi J_0(M)]^2 + [\delta M J_1(M)]^2} |\sin(\varphi + \varphi_1 + \zeta)|$$

其中

$$\zeta = \tan^{-1} \frac{(\delta\varphi)J_0(M)}{(\delta M)J_1(M)} \quad (11)$$

由於  $\sin(\varphi + \varphi_1 + \zeta)$  為一空間高頻函數，因此影像

圖 2.  
表徵推力為 40 mV 時鋁  
合金平板第二振型傳統  
ESPI 影像，(a) 節線為  
暗紋，(b) 節線為亮紋。



條紋位置將由函數  $\sqrt{[\delta\varphi J_0(M)]^2 + [\delta M J_1(M)]^2}$  之區域極值決定；區域極大值顯現為亮紋，區域極小值則以暗紋顯示。由於  $\sqrt{[\delta\varphi J_0(M)]^2 + [\delta M J_1(M)]^2}$  之區域極值將因環境雜訊比 (ambient noise ratio, ANR) 值之不同而有差異，並可得知當 ANR~1 時，即 EF1 與 EF2 效應相當時，必須先解得 ANR 值，才得以分析干涉條紋，因此實際分析時有極高的困難度，於此不擬進一步討論。

為方便後續討論，將前面所述視環境雜訊為相位驅動力，並於相同表徵致振力下不同時刻振動影像相減以獲得干涉條紋影像之方法稱為 EDP-ESPI，並定義  $\delta\varphi/\delta M$  為環境雜訊比 (ANR)；同時以 KV 代表  $M$ 。

當 ANR >> 1，則所得之振動干涉影像條紋位置函數將可以簡化成為零階貝氏 (zero order Bessel function,  $J_0(x)$ ) 之絕對值，由其影像條紋之位置與級次 (order) 可計算出空間中相對應位置 KV 值，並由式 (9) 中核心值與表徵振幅之關係計算出空間位置之振幅大小；換言之，此時影像灰度值  $B$  可簡化表為下式：

$$B_{ANR \gg 1} \propto \sqrt{[\delta\varphi J_0(M)]^2} |\sin(\varphi + \varphi_1 + \zeta)| \quad (12)$$

相似地，若 ANR << 1，則 EDP-ESPI 所得干涉影像條紋位置函數則由第一階貝氏 (first order Bessel function,  $J_1(x)$ ) 絕對值所描述，此時影像灰度值  $B$  可表為下式

$$B_{ANR \ll 1} \propto \sqrt{[\delta M J_1(M)]^2} |\sin(\varphi + \varphi_1 + \zeta)| \quad (13)$$

與 ANR >> 1 相同，待測物各位置之振動位移值可由式 (9) 之相對應 KV 值計算獲得。經由上述推導，應用電子影像光斑干涉術於振動量測時，環境雜訊影響模式已建立，且分析方式將因 ANR 值的不同而有不同。

### 三、實驗設計

建立一個可控制 ANR 參數之實驗驗證系統並不容易，為克服此一困難，本文實驗驗證並不直接建立可控制 ANR 參數之實驗系統，而是應用現有 ESPI 光學架構進行振動量測，據以分析實際量測干涉條紋影像，並求得  $|J_0|$  與  $|J_1|$  之比值。實驗採用厚度 3.2 mm 之 6061-T6 完整鋁合金平板試片，試片兩端夾持，另兩端為自由端，訊號產生器經由改變電壓輸出至致振器可得不同表徵推力，實驗所使用之電壓值計有 20 mV、30 mV、40 mV 等三組；由於傳統電子光斑影像系統於取像時，易產生影像忽明忽暗，條紋黑白反相所造成之條紋飄移現象，如圖 2 所示，本研究將處於相同表徵推力下之影像相減，所獲得之干涉條紋影像如圖 3 所示。

### 四、結果與討論

由圖 3 中可見表徵推力不同造成條紋級次亦有所不同，由圖 3(a) 計有 3 級暗紋，圖 3(b) 則有 5 級暗紋，至圖 3(c) 則達 6 級暗紋以上。惟比較本實驗所取得影像與傳統電子光斑影像系統中條紋分布及灰度值分布情形，如圖 4 所示，圖 4(a)、4(b) 與 4(c) 分別為 20 mV、30 mV、40 mV 等三組實驗

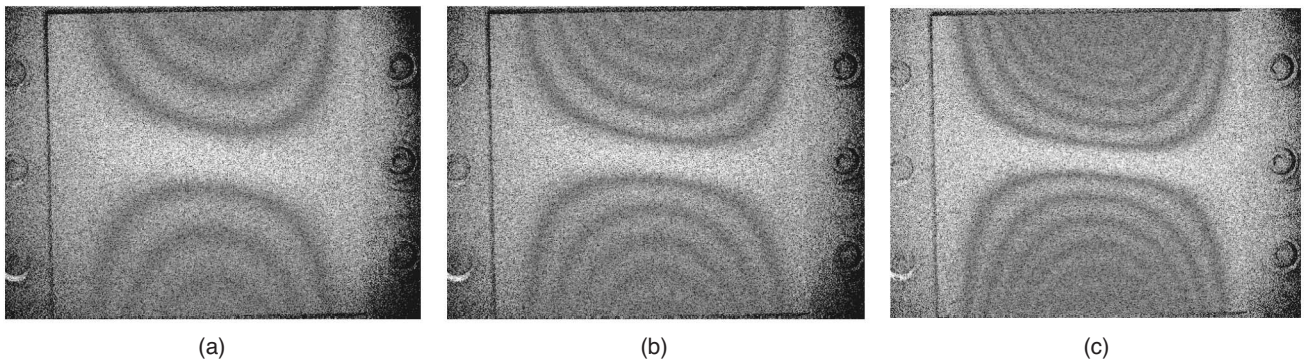


圖 3. 不同表徵推力下之鋁合金平板第二振型，(a) 表徵推力 20 mV，(b) 表徵推力 30 mV，(c) 表徵推力 40 mV。

所得之灰度值資料。可以發現，在同樣的表徵推力之下，EDP-ESPI 所獲致之條紋數目比傳統動態電子光斑影像系統的條紋多出一倍。為進一步分析環境干擾之影響，將 EDP-ESPI 所獲致之條紋影像應用 FFT 空間濾波方式，去除高頻光斑雜訊後，將灰度值均值化 (normalized) 如圖 5 所示，再以  $\sqrt{[\delta\phi J_0(KV)]^2 + [\delta M J_1(KV)]^2}$  進行影像灰度值湊配 (fitting)，求取不同表徵推力下  $|J_0|$  與  $|J_1|$  之比值。並求得於表徵推力值為 20 mV 時  $|J_0|$  與  $|J_1|$  比值約為 9；當表徵推力值增加為 40 mV 時  $|J_0|$  與  $|J_1|$  比例約為 3；惟表徵推力為 30 mV 時則因灰度值萃取誤差太大而無法比值。由 (10) 式可知， $|J_0|$  主要源自於背景雜訊對光學系統之影響，而  $|J_1|$  則為環境雜訊與致振器雜訊作用於待測物之效應。而致振器由函數產生器所推動，由於函數產生器之雜訊隨輸出之增加而增加，因此隨著表徵推力之增加，

將隨之增加其比重，因此雖獲致結果缺乏表徵推力 30 mV 之資料，但仍可推論表徵推力低時，環境干擾作用對於光學系統上之效應較為明顯，此時  $|J_0|$  為干涉條紋影像灰度值之主控函數。當表徵推力增加時，環境干擾因素作用於試片的比例也隨之增加，因此  $|J_0|/|J_1|$  比值也隨之下降。以本實驗而言， $|J_1|$  重要性雖然有所增加，但干涉條紋影像灰度值之主控函數仍為  $|J_0|$ 。

如前所述，ANR 比例不同時必須以不同方式分析所獲得之振動干涉條紋影像，如  $ANR \gg 1$  則所得之影像條紋得以零階貝氏函數進行計算， $ANR \ll 1$  時則必須以一階貝氏函數計算振幅。而實驗結果顯示，在同樣的表徵推力之下，EDP-ESPI 所獲致之條紋數目比傳統動態靜態影像相減所得之干涉影像條紋多出一倍，且不易發生影像忽明忽暗，條紋黑白反相等條紋飄移現象，因此以電

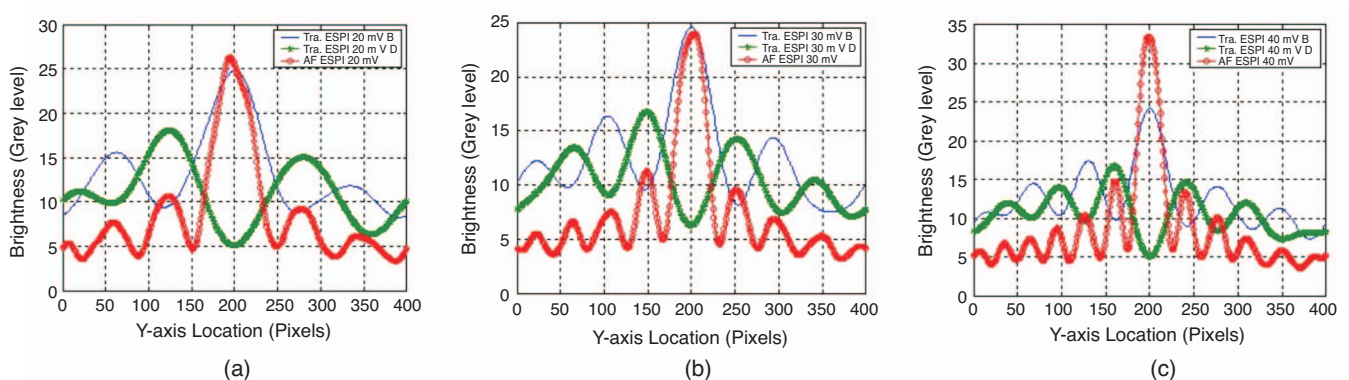


圖 4. 不同表徵推力下之鋁合金平板第二振型灰度值分部圖，其中綠色及紅色曲線代表傳統 ESDPI 所獲得兩種影像灰度值分布，藍色曲線則為兩相同表徵推力下相減後所獲得之干涉條紋灰度值分布曲線，(a) 表徵推力 20 mV，(b) 表徵推力 30 mV，(c) 表徵推力 40 mV。

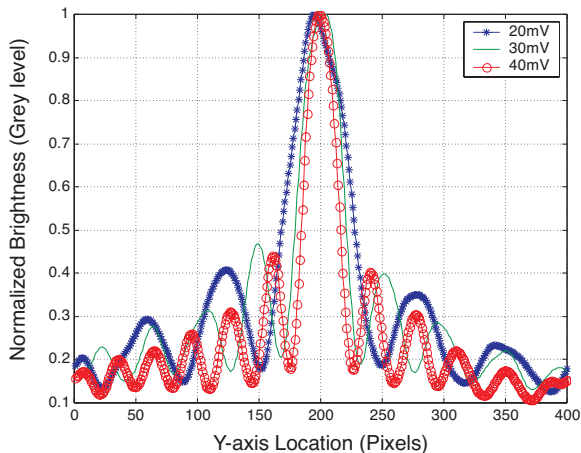


圖 5. 不同表徵推力下振動干涉影像均值化後之灰度值。

子光斑干涉術進行振動量測時，EDP-ESPI 確可增加量測精度與影像穩定度。惟  $|J_0|/|J_1|$  比值將隨表徵推力變化而有變化，因此建立完整分析方式實有必要。圖 6 所示為  $ANR \geq 1$  時  $KV$  - 灰度值關係圖。由圖中可知  $ANR = 1$  時， $KV$  - 灰度值曲線幾乎成單調下降，區域極大及極小值均不明顯，因此干涉條紋影像極為模糊。當  $ANR > 1$ ，則  $KV$  - 灰度值區域極值發生位置與  $|J_0|$  區域極值時之  $KV$  值均極相近，因此  $ANR > 1$  時，所得之干涉條紋影像亮紋以  $|J_0|$  區域最大值分析，則核心值  $KV$  將不引入任何誤差。若以  $|J_0|$  之區域極小值進行暗紋分析，以  $ANR = 2$  為例，則第一級暗紋處所得  $KV$  誤差約為 5%，第二級暗紋  $KV$  值誤差則快速降為 1% 左右，因此應用零階貝氏函數計算  $ANR > 1$  時干涉條紋影像暗紋時，應以第二級以上暗紋進行分析為宜。與  $ANR > 1$  相反，當  $ANR < 1$  時，暗紋所在位置  $KV$  值如以  $|J_1|$  區域極小值進行估算，則  $KV$  將不引入任何誤差值；但若以  $|J_1|$  進行亮紋分析，以  $ANR = 0.5$  為例，第一級亮紋  $KV$  值誤差將高達 16%，但第二級亮紋  $KV$  值誤差則快速下降至 1% 左右；因此  $ANR < 1$  欲採用  $|J_1|$  作為亮紋  $KV$  值量化分析時，應以第二級以上之亮紋進行分析為宜。綜合而言，進行振動量測其分析方法可直接以  $|J_0|$  分析  $ANR > 1$  之亮紋並以  $|J_1|$  分析  $ANR < 1$  之暗紋，但對於  $ANR > 1$  之暗紋與  $ANR < 1$  之亮紋，雖仍可分別以  $|J_0|$  與  $|J_1|$  估算  $KV$  值，但宜採用第二級以上條紋級次進行分析。

在實際量測時，判斷  $KV$  值應以  $|J_0|$  抑或  $|J_1|$  進行分析極為重要。由圖 6 可知， $ANR \geq 1$  時，干涉條紋影像最亮區域將發生於  $KV = 0$ ，即為待測物振動之節線（點）或位移為零的位置， $ANR < 1$  時，節線（點）與位移為零之區域將因  $ANR$  值之不同而可能為暗紋或亮紋，如為亮紋則緊鄰全域最亮之亮紋，且亮紋間並無明顯暗紋存在；依據上述準則即可輕易的判斷出應以  $|J_0|$  抑或  $|J_1|$  估算  $KV$  值。

## 五、結論

本文建立電子光斑影像干涉術環境干擾分析數學模式，將環境干擾因素視為相位驅動力，並分別作用於光學系統與待測物上，並獲致以下重要結論。

1. 將處於相同表徵推力作用下振動影像相減，則可得環境雜訊作用於光學系統與待測物之效應可分別以  $|J_0|$  與  $|J_1|$  描述。
2. 可經由調控  $ANR$  值獲致兩種不同之量測系統，即  $ANR \gg 1$  時， $|J_0|$  為干涉條紋影像灰度值之主控函數， $ANR \ll 1$  時，則  $|J_1|$  為干涉條紋影像灰度值之主控函數。
3. 未調控  $ANR$  時，除  $ANR = 1$  時無法進行干涉條紋影像外，當  $ANR > 1$  時，可以  $|J_0|$  區域極大值計算干涉影像亮紋之  $KV$ ，當  $ANR < 1$  時，則可以  $|J_1|$  區域極小值計算干涉影像暗紋之  $KV$  值，兩者均不會引入誤差值。

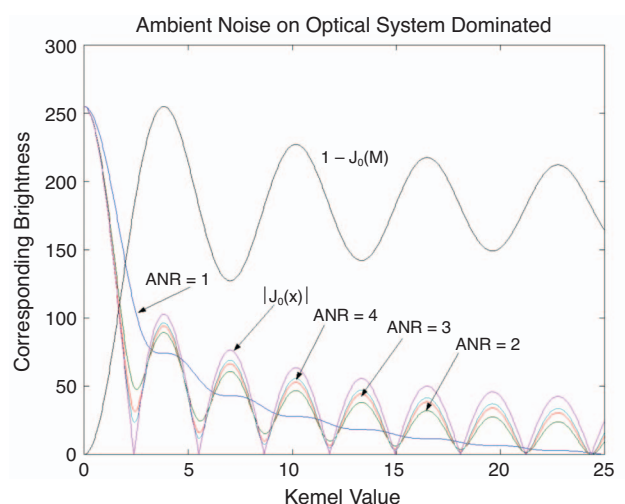


圖 6.  $ANR \geq 1$  時，灰度值與  $KV$  值之關係圖。

4. 未調控 ANR 時，當  $ANR > 1$ ，若以  $|J_0|$  區域極小值計算干涉影像暗紋 KV 值，及  $ANR < 1$  時以  $|J_1|$  區域極大值計算干涉影像亮紋之 KV 值，宜用於估算第二暗 (亮) 紋以後之 KV 值，以避免過大之誤差。

## 參考文獻

1. J. A. Leendertz, *J. Physics E*, **3**, 214 (1970).
  2. R. Jones and C. Wykes, *Holographic and Speckle Interferometry*, Cambridge: Cambridge University Press (1989).
  3. E. Vikhagen, *Applied Optics*, **29**, 137 (1990).
  4. S. Winther, *Optics and Lasers in Engineering*, **8**, 45 (1988).
  5. O. J. Løkberg and K. Høgmoen, *App. Opt.*, 2701 (1976).
  6. J. N. Butters and J. A. Leendertz, *J. Measurement and Control*, **4**, 349 (1971).
  7. K. Høgmoen and O. J. Løkberg, *Applied Optics*, **16**, 1869 (1977).
  8. W. C. Wang, C. H. Hwang, and S. Y. Lin, *Applied Optics*, **35** (22), 4502 (1996).
  9. W. O. Wong, K. T. Chan, and T. P. Leung, *Optics and Laser Technology*, **29** (4), 179 (1997).
- 
- 黃吉宏先生為國立清華大學動力機械工程博士，現任國科會精密儀器發展中心研究員。
  - 王偉中先生為美國愛我華州立大學工程力學博士，現任國立清華大學動力機械工程學系教授。
  - 徐宗偉先生為國立清華大學動力機械工程碩士，現任廣輝電子公司工程師。
  - Chi-Hung Hwang received his Ph.D. in power mechanical engineering from National Tsing Hua University. He is currently a researcher at Precision Instrument Development Center, National Science Council.
  - Wei-Chung Wang received his Ph.D. in engineering mechanics from the Iowa State University, USA. He is currently a professor in the Department of Power Mechanical Engineering at National Tsing Hua University.
  - Tzong-wei Hsu received his M.S. in power mechanical engineering from National Tsing Hua University. He is currently an engineer in the Quanta Display Incorporation.