

# 迴轉機械內部噪音源的確認

林鴻裕，王栢村，吳志興

國立屏東技術學院  
機械工程技術學系

## INTERNAL NOISE SOURCE IDENTIFICATION FOR ROTARY MACHINERY

H. Y. LIN, B. T. WANG, C. H. WU

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING TECHNOLOGY  
NATIONAL PINGTUNG POLYTECHNIC INSTITUTE

### 摘要

本文介紹一個簡單且新穎的方法來幫助迴轉機械內部噪音源的確認，所討論的機械是一個小型的冰箱迴轉式壓縮機。因為此種機械是密閉式的，所以非常須要一套內部量測方法及外部噪音的量測，利用這些可測得的資訊來分析推理機械內部之可能噪音源。這種內部噪音源的確認是一種靠量測到的資訊，資料處理及分析，以及分析者的既有知識來做判斷的一套系統方法。簡而言之，就是以一套較客觀的方法來取代單由人的感覺來確認噪音源以減低主觀因素的影響。

關鍵詞：迴轉機械、噪音源、噪音源確認、內部量測、噪音量測

### ABSTRACT

This paper presents a simple and novel approach to help identify internal noise source mechanisms for rotary machinery. The machinery discussed here is a small, rotary, refrigerant compressor. Because it is hermetic, the rotary compressor needs some internal measurement scheme and external noise measurement to collect data for further analyses such that internal source mechanisms might be identified. This type of noise source identification is based on a system approach that uses measured data, data processing and analysis, and knowledge of the analyst to make judgement. In short, the goal of this research is to develop a more objective method to replace human brain in noise source identification so that the influence due to subjective factors can be reduced.

Keywords: rotary machinery, noise source, noise source identification, internal measurement, noise measurement.

## 一、諸論

因為政府法規的訂定及來自消費者的注意力，機械噪音的控制對於製造業者而言已是一件刻不容緩之事了。製造業者如汽車工業，飛機工業，及家電工業等已正在積極地尋求合理之道來解決他們各自的噪音問題。由於機械噪音問題本質相當複雜，一個有效的策略來降低機器的噪音往往須要經過徹底的研究後才能設計出來。很不幸的，一般製造業者時常為了急著來解決其噪音問題而用很直接的嘗試錯誤法 (cut and try)。如此的解決之道雖可應一時之需但卻無法提供機器內部噪音產生及傳輸的詳細理由，所以往往會造成只知其然不知其所以然的情形，這樣的結果當然不是一個有效率之解決之道。

任何一個噪音控制問題均可以從三個基本的因素來考慮那就是：噪音源 (Source)，傳輸途徑 (Path)，及接受部門 (receiver)。視經濟的許可及問題的複雜性而定，噪音控制可以只考慮一個因素或同時考慮二個以上的因素。在大部份情形之下，對噪音源的瞭解是很需要的，因為此瞭解能夠提供到底可不可能在噪音源來減低噪音的訊息、因此利用一個合適的噪音源確認方法來找出控制機器內部噪音產生的設計參數是非常重要的。

機器內部噪音源確認通常是有直接及間接二種方法。直接法是在缺乏瞭解之下先假設已知的噪音源，然後來改變某些可能影響噪音產生的設計參數，最後再量測新的噪音並與先前量測的噪音資料相比較，假如有發現明顯的噪音改變則停止這整個過程，不然的話再改變設計參數及重做噪音量測。為了來得到一個有意義的結論，通常不同的機器（但有相同的設計）會被拿來做相同的噪音測試以做印證。由此可知，這直接的方法是很浪費時間及金錢的。另外一個缺點是儘管噪音度可能會被減低，真正噪音源的訊息卻不一定能被掌握。

在另一方面而言，間接法並不是靠以上的嘗試錯誤法直接測試而是靠機器內部接近噪音源的量測信號 (measured signals)。這些內部可測得到的信號提供一個類似機器內部過程 (processes) 的照片來作為推理內部噪音源的依據。由此可知，間接法此直接法能提供更多的噪音源訊息。在間接法中，一連串的感測計 (sensors) 被裝於機器中來量測不同的內部過程而麥克風 (microphone) 被裝置

於機器外側來量測噪音。這些內部所量測的過程首先被假設為可能的噪音源，然後利用信號處理方式來得到合適的信號特徵作為確認噪音源的比較分析用。由此分析得到的結果可以用來建立真正噪音源的概念，而這些噪音源概念可以再設計一些實驗來證實他們。

本文所討論的主題為如何利用間接法來確認迴轉機械內部的噪音源。首先介紹的是頻率域的噪音源確認方法及當其被用於迴轉機械上的缺點，然後介紹本文所使用時域之方法及其在一迴轉式壓縮機上的運用，最後作討論及結語。

## 二、頻率域的噪音源確認法

傳統式的頻率域噪音源確認是利用結合度 (coherence) 分析法。這結合度函數是在某一個頻率上對兩個不變化的隨機信號 (stationary random signal) 間的線性結合程度的一個衡量 [1]。在噪音源確認這個領域內可找到的結合度分析法有四種：一般的，多重的，部份的，及實質的。一般的結合度函數是利用單一輸入及單一輸出 (single input/single output) 模型來建立的，所以只有處理二個信號。多重的結合度函數是利用多重輸入及單一輸出 (multiple inputs/single output) 模型來建立的。它是一個對多重輸入信號在單一輸出信號能量上所佔比例的估計。假如在這些輸入中間沒有存在任何相互關係的話則多重結合度函數就等於每一輸入信號及輸出信號之一般結合度函數之和。假如有任何相互關係存在的話則多重結合度函數就沒法來正確地評估每一輸入信號在輸出信號上所佔的比例。為了要消除這相互關係的影響，部份結合度函數於是被導出給多重輸入及單一輸出系統。這部份結合度函數是二個信號在除去其他信號的影響後所計算的結合度。部份結合度函數的計算須要假設在輸入信號之間的能量流程方向已知才能進行。這能量流程方向在實際的情形很難得知，尤其是在輸入信號間若存在有很高的相互關係的話。實質結合度法即是針對此缺點而被發展出來的，它的主要作法為利用一個線性轉移將輸入信號的波譜矩陣 (spectral matrix) 旋轉到正交軸上。這個方法可以用來找出在一個多重輸入及單一輸出系統中無結合度噪音源的數目，然而假如輸入信號間有很強的結合度則此法很可能將所有輸入信號轉換成

只有一個映源 (image source)。

除了上述的輸入信號間高相互關係的問題外，結合度法的另外一缺點是它並不適合被用來分析具有變化隨機 (nonstationary random) 特色的輸出及輸入信號，因為結合度法在估計這些信號的波譜時是假設他們是不變化隨機的信號。對迴轉機械而言，這信號變化隨机的特色對噪音源的確認是很重要的，因為這特色能提供在一工作週期內不同過程事件 (process event) 的發生。這些時域的資訊可以針對不同事件來作分析因而來幫助確認噪音源，但是由於信號變化隨机的特色頻率域的方法不能用來作分析。因此，對於此時域噪音源確認法可行性的調查是非常有必要，而本文以下部份就是要來探討如何利用時域的方法來確認迴轉機械內部的噪音源。

### 三、時域的噪音源確認法

本文所介紹的時域噪音源確認法包括三大部份：

(1)信號特徵的導出(2)信號事件的定義(3)信號事件的分析。由於在迴轉機械中量測到的信號在一工作週期中具有變化隨机的特徵，所以時域法首先要作的即是如何將這特徵導出保留後再根據由噪音信號所定義的不同事件來作分析，最後加上分析者的既有知識及經驗來做噪音源的確認。

當一個迴轉機械運轉於穩定的狀態下，外部測到的噪音及內部測到的信號由於受到的是週期性的激起 (excitation) 所以應是具備有重複性的波型。理論上，一個真正週期性的信號應是由一個真正週期性的激起所產生的。但在實際機械的運轉中，總是有些偏差來影響這個理想的情形，而這偏差通常是因為有流體過程 (如：在壓縮機及內燃機內) 的非週期性響應的參入而造成的。所以當這些流體過程受到週期性外力的激起時，內部量測到的信號雖然外面的輪廓看起來是重複的，其實它的細部結構卻是隨机的。又因為在一個工作週期內這信號的隨機結構是隨時間而變的，所以才叫這種信號為變化隨機信號。在迴轉機械中，這隨機信號的變化性是由於內部過程中有暫態 (transient) 事件發生於工作週期內的不同位置之故。這些暫態事件對內部噪音源的確認是非常重要的資訊。以下介紹的是如何來將信號的隨機變化的特徵導出以作為進一步分析之用。

在頻率域中信號特徵的導出通常是利用FFT分析儀來作，而所導出的為在頻率域內的波譜。在時域中信號特徵的導出亦可利用FFT分析儀來作，經過樣本式平均 (ensemble averaging) 過程後取得信號特徵，而所導出信號的特徵為隨機信號的第二力距 (second moment)。圖(1)所示的即為這信號特徵導出的過程。FFT分析儀由啟動信號 (trigger signal) 控制來讀入一個區域 (block) 的感測器測得的信號資料。這個區域的資料先被平方後再取其50次的平均值，最後得到的是信號的第二力距波型。這個波型除了提供一個信號內事件第二力距變化的情形外也提供事件在機器工作週期中發生的位置，這對噪音源的確認而言是非常重要的。這裡要注意的是有關啟動信號，這個信號的取得是利用在機器轉動軸上的一個小針，當轉動軸每轉一圈則就產生一個脈動式的波形，利用這脈動式的同步信號來啟動FFT分析儀讀取資料則可以保證每一區域的資料均來自同樣的隨機過程。另一點要注意的是取得信號第二力距值的平均次數，50次是由實驗研究出來的，選擇50次的理由是再加多平均的次數並不會改變信號第二力距值。

在導出噪音及內部過程信號特徵之後要做的是分析比較這些資料以得出內部過程及噪音的相互關係，進一步由這個相互的關係可以來推理機器內部的噪音源。以下所要討論的是有關這信號特徵比較分析用的數學模型，資料的預先處理，多重線性 (multicollinearity) 問題，以及主要成分 (principal component) 回歸分析 (regression analysis)。

信號事件分析的目的當然是要利用不同信號的第二力距波型來找出噪音及內部過程信號在不同事件上的相似程度，而作此分析的方法可以簡單如目力判斷或較複雜的如系統確認 (system identification)。對一個多信號噪音源確認的問題，系統確認法是比較理想的，因為它用一個數學模型來取代人腦作分析，所以對信號特徵的比較應該是較客觀。由於第二力距波型是由時域信號平方後取平均值而得，所以像結合度法所用的動態模型是無法使用，而需要用靜態模型。這靜態模型就是線性多重回歸 (linear multiple regression) 模型。使用一個靜態模型的二個主要假設為(1)所有噪音的傳輸途徑均為線性的(2)噪音途徑的脈衝響應 (impulse

response) 在相當短的時間內就消失。

在將資料送入模型分析前需要經過一些預先處理，這些處理包括(1)事件長度的定義(2)時差的調整(3)事件的檢測。事件長度的定義是第一且是最重要的一步，因為這是有關事件的定義，若定義錯了則以下的分析結果都是沒意義。在本文中，事件長度的定義是由分析者對物理過程的工程判斷及第二力距波型的結構所決定。事件長度定義完後再來需要調整噪音及內部過程信號之間的時差。這時差的產生是由於量測距離的差異所造成的，例如噪音的量測位置是在距離機器約二英尺的地方，則聲波由機器傳到麥克風是還要一段時間的。資料預先處理的最後步驟為事件的檢測。這事件的檢測乃是要在事件分析前將在這事件長度內沒有顯著波型的內部過程信號除去。當信號事件由噪音第二力距波型定義好之後，整組的資料就被分成事件及非事件。事件的檢測規則就是以事件比非事件的顯著程度來定，至於如何來決定此比值，就要靠嚐試法來決定，並沒有特定的標準。

在信號事件分析中主要的結果就是要找出每一個內部過程信號對噪音信號特徵的相似性而這相似性可由線性回歸模型中的係數來評估。這係數的可靠度則視所有的內部過程信號是否完全沒有關係 (mutually independent) 而定，對實際測到的資料而言這相互的關係多多少少均存在的，其對模型中係數估計的影響則視其程度而定。這內部信號間存在的相互關係有時就叫做多重線性問題 [2]。在統計學領域內有許多方法可以用來對付這個多重線性的問題，本文所介紹的方法是叫做主要成份回歸分析。這個方法是比較簡單且容易被工程師所接受。

在主要成份回歸分析中的主要數學問題是在解回歸模型的係數時找一個獨特的矩陣來將關連 (Correlation) 矩陣對角化 [3]。假如這個獨特的矩陣是由關連矩陣的葉根向量 (eigenvector) 所組成的話則此對角化矩陣的對角線上的值就是關連矩陣的葉根值 (eigenvalue)。因為用關連矩陣來解回歸模型的係數時，多重線性因素的影響即表現在這些葉根值上。假如有很小的葉根值存在 (表示有很強的多重線性關係存在) 的話，則解出的回歸模型係數極不準確。所以若能將這很小的葉根值除去後再解回歸模型的係數則可減少多重線性因素的影

響，而主要成份回歸分析即是利用此原理來解係數的。在主要成份回歸分析中首先將資料矩陣轉移到主要成份的軸上，然後用具有大葉根值的主要成份來作回歸分析求得模型係數。因為在實際的情形下很難決定到底葉根值要在多小之下才除去不用，所以主要成份回歸分析中就解了多次的回歸模型，第一次用一個主要成份，第二次用二個主要成份……等。

整個信號事件分析的過程是由一個福傳程式來處理，圖(2)所示的為這個程式的流程圖。對每個信號事而言，所有第二力距的資料均預先照前述的方法處理過再進行主要成份回歸分析。

#### 四迴轉式壓縮機噪音源的確認

本文所考慮的迴轉機械為一個小型迴轉式的冰箱壓縮機，圖(3)所示的為其斷面圖。因為沒有用吸入閥 (所以吸入氣的過熱較小) 的關係，迴轉式壓縮機的效率比往復式的較佳。同時因為機械的平衡較好，迴轉式壓縮機的結構振動較小，也因此藉著直接把馬達及泵單位焊接到外殼上而將迴轉式的做得較小。因為沒有用軟的懸吊系統來支撐馬達及泵單位，迴轉式壓縮機對於噪音的隔絕方面也許不會比往復式的較佳。也由於上述的原因整個壓縮機結構的時間常數是較短，所以噪音的產生及傳輸均在很短的時間內完成，外面測到噪音信號的時間及強度應可以對映到內部過程信號的時間及強度上。因此之故，本文選擇迴轉式壓縮機的噪音問題研究來作為時域噪音源確認法的運用。

為了要決定內部信號的量測位置及感測器的種類，對壓縮機內部“可能”的噪音源及傳輸途徑有一些初步的瞭解是必要的。圖(4)所示的就是這些“可能”的噪音源及傳輸途徑。根據以前的研究者所得的結論，迴轉式壓縮機的主要噪音源有下列幾項：(1)在氣缸室內的氣體脈動 (gas pulsation) (2)轉動軸的振動(3)在出氣閥打開後所引起的噴射流 (jet flow) (4)氣體共振(5)板殼振動(6)電磁力。參考這些結論及圖(4)後，內部信號量測位置及感測器的種類乃被決定。表(1)記載這些量測位置及感測器。

利用前面介紹的方法這些內部信號及噪音信號的特徵均被導出。圖(5)所示的就是頻率範圍3000到5000Hz所有信號的第二力距波型。在此圖中有二個事件由噪音信號 (SP) 的波型來定義。在定義好事

件之後，這些內部信號及噪音信號的資料乃經過事件分析。在這事件分析中總共有三組資料：(1)低噪音組 (LNL) (2)中噪音組 (MNL) (3)高噪音組 (HNL)。這三組資料分析後得到的回歸係數依不同的事件及非事件比值而分列於表(2)及表(3)，表(2)中的事件及非事件比值為 2，而表(3)為 4。由此二表中係數值可得知第一噪音事件的產生應該是由機械式接觸所引起的，因為結構振動的信號CA及SA較像噪音信號，其他氣體的信號則較不像。第二噪音事件的產生應該是由於高壓的氣體在出氣閥打開時振動整個結構體所致，因為出氣閥外的壓力PV及CA和SA信號較像噪音信號。

## 五、討論與結論

由本文以上的討論可以得下列的幾項結論：

- (1)一個簡單且新穎的內部噪音源確認法已在時域中被發展出來。這個方法最適合被用於時間常數很短的結構系統，例如像本文中所介紹的迴轉式壓縮機。
- (2)本文所介紹的方法可以用來處理信號變化隨機的特徵以及信號之間高的相互關係，這兩個問題一般的頻率域方法是沒法處理的。
- (3)由對迴轉式壓縮機的運用所得的結果看，本文所介紹之方法可以幫助分析者來建立噪音源的概念。
- (4)對3000到5000Hz這個頻率範圍而言，這迴轉式壓縮機的噪音問題牽涉到機械及流體式的兩種噪音源，並且兩個主要事件必須同時考慮進去於設計噪音控制的策略時。
- (5)本文所介紹之方法的限制是一次只能研究一個頻率範圍及重疊的噪音事件則很難將其分割。

## 六、誌謝

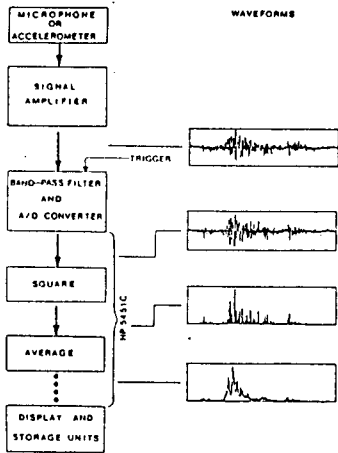
作者感謝美國普渡大學的Herrick Lab. 所提供的優良研究環境和設備及奇異公司對研究計劃上的經濟支持。

## 七、參考資料

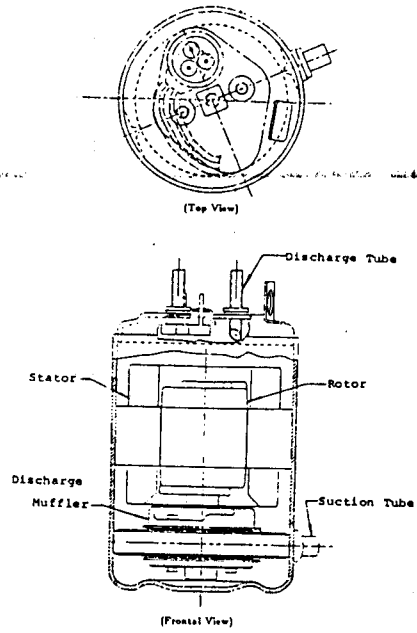
- (1) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*, John Wiley & Sons, 1980.
- (2) Farrar, D. E. and Glauber, R. R., "Multicollinearity in regression analysis

: The problem revisited," *Rev. of Economics and Statistics*, 49, 92-107.

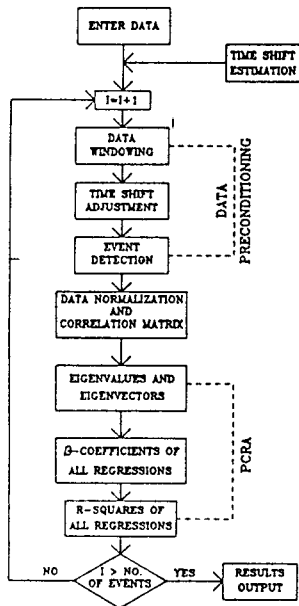
- (3) Steinberg, D. I., *Computational Matrix Algebra*, Mc Graw-Hill, 1974.



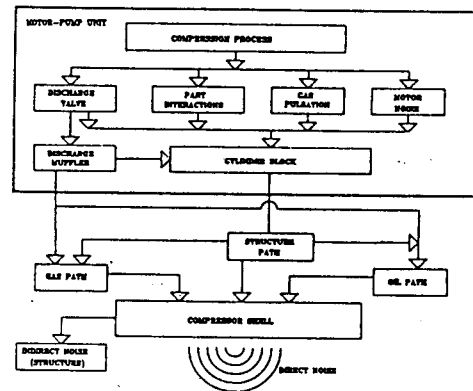
圖(1)時域信號特徵導出的過程



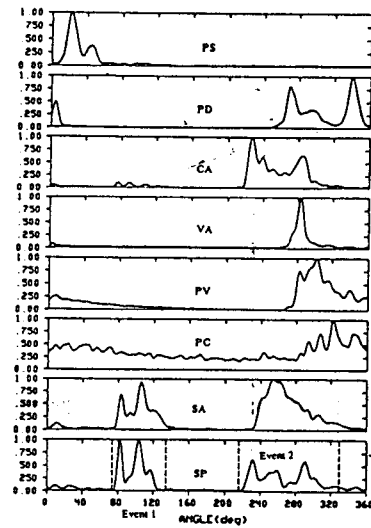
圖(3)迴轉式壓縮機的断面圖



圖(2)時域信號事件分析程式的流程圖



圖(4)迴轉式壓縮機內部可能的噪音源及傳輸途徑



圖(5)內部信號及噪音信號的第二力距波型

| No | Signal               | Sensor Type                 | Location            |
|----|----------------------|-----------------------------|---------------------|
| 1  | Suction Pres. (PS)   | Dynamic Pres. PCB 1112A     | Low Side Chamber    |
| 2  | Discharge Pres. (PD) | Dynamic Pres. PCB 112A      | High Side Chamber   |
| 3  | Cylinder Accel. (CA) | Accelerometer Endevco 2221F | Cylinder            |
| 4  | Valve Displ. (VA)    | Proximitgr BN 3106          | Valve Backer        |
| 5  | Vol. Cup Pres. (PV)  | Dynamic Pres. PCB 112A      | Muffler Cavity      |
| 6  | Case Pres. (PC)      | Dynamic Pres. KIC 601A      | Shell Cavity        |
| 7  | Shell Accel. (SA)    | Accelerometer B&K 4344      | Shell               |
| 8  | Sound Pres. (SP)     | Microphone B&K 4165         | Standard Location 1 |
| 9  | TDC Trigger          | Proximitgr BN 3500N         | Under Shaft         |
| 10 | Case Temp.           | Thermocouple T-Type         | Shell Cavity        |

表(1)量測信號的位置及感測器種類

| EVENT 1 |     |    |     |    |      |    |     |                |          |
|---------|-----|----|-----|----|------|----|-----|----------------|----------|
| CASE    | PS  | PD | CA  | VA | PV   | PC | SA  | $\lambda_{cr}$ | $R_{xy}$ |
| LNL     | .45 | x  | .18 | x  | .03  | x  | .45 | .8             | .90      |
| MNL     | .28 | x  | .39 | x  | -.07 | x  | .39 | .8             | .87      |
| HNL     | x   | x  | x   | x  | .02  | x  | .44 | .0             | .45      |

| EVENT 2 |    |      |     |      |     |     |     |                |          |
|---------|----|------|-----|------|-----|-----|-----|----------------|----------|
| CASE    | PS | PD   | CA  | VA   | PV  | PC  | SA  | $\lambda_{cr}$ | $R_{xy}$ |
| LNL     | x  | -.15 | .58 | .30  | .04 | x   | .24 | .8             | .84      |
| MNL     | x  | .11  | .17 | .19  | .29 | .26 | .24 | .3             | .89      |
| HNL     | x  | .19  | .28 | -.04 | .23 | .16 | .25 | .3             | .92      |

表(2)內部信號的回歸係數 (事件及非事件比值=2)

| EVENT 1 |    |    |     |    |    |    |     |                |          |
|---------|----|----|-----|----|----|----|-----|----------------|----------|
| CASE    | PS | PD | CA  | VA | PV | PC | SA  | $\lambda_{cr}$ | $R_{xy}$ |
| LNL     | x  | x  | .21 | x  | x  | x  | .90 | .0             | .95      |
| MNL     | x  | x  | .49 | x  | x  | x  | .49 | .3             | .92      |
| HNL     | x  | x  | x   | x  | x  | x  | x   | x              | x        |

| EVENT 2 |    |      |     |      |     |    |     |                |          |
|---------|----|------|-----|------|-----|----|-----|----------------|----------|
| CASE    | PS | PD   | CA  | VA   | PV  | PC | SA  | $\lambda_{cr}$ | $R_{xy}$ |
| LNL     | x  | -.11 | .70 | x    | .25 | x  | .22 | .5             | .82      |
| MNL     | x  | .23  | .20 | .03  | .29 | x  | .26 | .8             | .84      |
| HNL     | x  | x    | .32 | -.06 | .22 | x  | .33 | .3             | .92      |

表(3)內部信號的回歸係數 (事件及非事件比值=4)