

## 激振器音圈品質檢驗流程建立與應用

王栢村<sup>1</sup> 林政滄<sup>2</sup> 李昆達<sup>3</sup>

<sup>1</sup>國立屏東科技大學 機械工程系 教授

<sup>2</sup>國立屏東科技大學 機械工程系 研究生

<sup>3</sup>金頓科技股份有限公司 研發處處長

Email: wangbt@mail.npust.edu.tw

國科會計畫編號：NSC 92-2622-E-020-004-CC3

### 摘要

本文主要目的是採用實驗模態分析，建立音圈結構不同階段之品質檢驗標準及檢驗流程，包括：音圈鑄件、切削加工之音圈、完成繞線之音圈。首先利用目視剔除不良品，若是目視無法觀察判斷，保留此產品利用振動特性分析判斷協助目視是否為良品與否，做為品質改善為特性，找出激振器音圈的特性狀態記錄之做為往後參考的依據，如良品及不良品的區分，並建立品質完整檢驗標準作業流程。未來所建議標準作業流程可長期建立音圈資料庫，做為檢驗瑕疵品經驗依據，正確掌握出廠音圈結構特性紀錄，做為確切掌控激振器音圈性能與產品品質。

關鍵詞：實驗模態分析、音圈、標準作業流程

### 前言

激振器音圈為振動試驗機主要組件之一，音圈結構包含電樞結構及線圈，主要利用線性馬達原理[1,2]，產生線性之上下移動，有關音圈設計之文獻，大多集中在揚聲器、電磁激振器[3-7]及電腦周邊如磁碟機[8]位置控制等，鮮少有對大型激振器之音圈結構問題有深入的探討分析。尤其相較於電磁激振器之應用為迷你型，如Honda及Yamasaki [9]製造一微小電磁激振器，在無負載時其轉速可達400rpm，並可逆向運轉。而在大型振動試驗機之激振器的音圈結構屬大型，對結構動態特性在低頻率之影響甚鉅。音圈結構振動特性必須符合振動試驗機之設計要求。

在激振器的分析方面，文獻中有諸多的方法進行分析，國外的學者亦有從事激振器方面研究分析有Koh et al. [8]採用最佳化設計的概念，利用有限元素分析在激振器馬達中的磁鐵形狀，得到最佳化型狀設計。So及Yang [10]利用有限元素法，首先選用三維立體元素，進行激振器之振動特性分析，假設在激振器圓周圍上加入外力進行分析，結果顯示其量測出移動量與有限元素法出來互相吻合，驗證其模型合理性及正確性。Hong及Hwang [11]以數值分

析的方法來分析具有跨隙激磁之電樞應效應的氣隙磁場分布。亦有利用有限元素法進行激振器之動態響應特性分析[10,12-13]。又激振器主要元件之一音圈，係為鑄件結構，由於形狀複雜鑄件品質不易控制，對音圈鑄件品質均需預先檢驗，才可進行切削加工，再作繞線以完成整體音圈結構。如何確認音圈品質之穩定性及可靠度，則有賴進一步提供快速簡便之檢驗方式，使能達到激振器移動件之設計要求。

本文是針對激振器音圈利用振動學角度，對此結構之振動特性之瞭解，及將結構較弱之處找出，利用振動特性分析判斷協助目視是否為良品與否，做為品質改善為特性，並建立所有產品振動特性資料，做為後續改善並將尺寸變更設計之用。

### 背景動機與音圈測試樣品概述

#### I. 背景動機與目的

如圖1激振器實體圖中之音圈，一般產品檢測方式多為目視檢查，若隱藏產品內部的缺陷，則很難去正確的檢驗之，本文是採用振動特性的方法，來對結構進行檢測，目的為如下敘述：

1. 輔助目視之不足。
2. 避免加工完成後才發現為不良品。
3. 減少不良品成本的浪費。
4. 確切的保障產品品質的確認。

首先採用預測式的方法與步驟，利用結構振動的方式，首先利用實驗模態分析的方法，固定量測相同的位置，得到所要的響應。再由初步品質檢驗的分析結果頻率響應函數，透過ME'scope軟體作曲線嵌合分析，來得到自然頻率。標準作業流程確切建立，不論在加工或完成品，及出廠等都可明確掌控之，達到品質最佳化，幫助公司建立品質優良形象，也使客戶得知產品是經過完整細密檢驗標準。標準作業流程的目的，預先掌握產品的品質，避免產品在任何一個加工作業流程中不良品持續加工，增加不必要的生產成本。

## II. 音圈測試樣品概述

針對圖2不同製程階段音圈實體圖說明如下，圖2(a)為音圈鑄造件；圖2(b)為加工後音圈；圖2(c)為包含線圈音圈。音圈製作流程為先由鑄造出來表面有毛胚，需到加工後得到較佳尺寸與表面，最後在音圈下環上繞線圈，就是由鑄造到加工後音圈在到包含線圈等加工程序來完成成品，大致上每一項都可區分為良品與不良品，依編號給鑄造，加工後包含線圈表格，預先告知良品與不良品的差異損壞的位置，如表1為音圈樣品總表，表中可看出為有三種case分別為鑄造、加工後、包含線圈以代號A、B、C來區分，代號後面的數目為其各別情況的編號，用來代表各種樣品數目，以及破壞的位置說明損壞情況。

### 實驗的方法與步驟

利用實驗模態分析得振動特性之頻率響應函數與自然頻率之探討，以確認音圈結構的好壞合格與否，作為音圈產品檢驗方式。圖3為激振器音圈進行實驗模態分析之實驗架構圖，首先利用吊繩，將激振器音圈懸吊在架子上型成自由懸吊情況，其實驗之原理為利用衝擊錘對振動試驗機不同激振器音圈激振，加速度計作感測器。加速度計來量測其響應訊號。透過頻譜分析儀來接收輸入訊號及響應訊號，並求得系統之頻率響應函數。透過ME'scope軟體作曲線嵌合分析，來得到自然頻率、振型、阻尼比。

實驗量測點數規劃如圖4之A、B、C，分別為頂面、葉片、環部位，加速度計分別量測其位置，將單軸向加速度計依序固定於頂面、葉片、環型部分之位置，量測點都在音圈結構邊緣上可得到較大響應，較易量測也可得到較佳響應，原則是移動加速度計做感應器，配合衝擊錘為驅動器來量測其不同激振器音圈。

本實驗是以衝擊錘固定敲擊1的位置，量測A、B、C點，敲擊次數為3次取平均，時間域下觀察是否有二次衝擊。敲擊一次可得到三筆資料，分別獲得1組三個頻率響應函數。量測各點並記錄之，以進行曲線嵌合求得激振器音圈之模態參數與頻率響應函數。

### 樣品測試結果與討論

首先從不同音圈結構求得實驗量測結果之模態參數和頻率響應函數比較分析。結果顯示實際模態分析結果不同音圈結構模態特性可以由模態參數和頻率響應函數，比較確認良品與不良品音圈差異性。表2為各不同音圈之頂面自然頻率表，在表2中如遇到無互相對應之結構自然頻率時，用一橫符號表示。圖5、6、7分別為鑄造、加工後、包含線圈激振器音圈實驗模態分析頻率在5kHz以內觀察頻率響應函數圖形。本實驗以衝擊錘固定敲擊1位置如圖4所示，分別得到圖上A、B、C的位置之頻率響應函數，不同音圈分析由以下做詳細說明。

## I. 鑄造之音圈：

如表2(a)為其頂面自然頻率及圖5所示左邊為良品的頻率響應函數圖形，右邊為不良品圖形的頻率響應函數，圖中A1試件，其中 $H_{a1}$ 、 $H_{b1}$ 、 $H_{c1}$ 分別代表頂面(A)、葉片(B)、環部位(C)、輸入點為1的位置的頻率響應函數如圖4所示，往後說明都是以此形式表示，綜合討論分析如下：

1. 由圖 5(a) 為頂面  $H_{a1}$ ，不良品在 2kHz 附近多了很多波峰，可能來自葉片破壞之影響。此點在圖 5(b),5(c)更可觀察到。
2. 由圖 5，良品之  $H_{ij}$  重疊性很高，但是在不良品為 A3 試件時，在圖 5(b)及 5(c)都看得出差異點，為葉片中有破壞及其邊緣與環之間有損壞之影響所致，重疊性較差，低頻 1kHz 左右出現反共振點，圖 5(c)也在 3000~3500Hz 之間出現多出來反共振點，可為判斷鑄造好壞的依據。
3. 表 2(a)在鑄造件頻率響應函數中，由於鑄造件為未加工，有預留加工尺寸，結構較強，得到的自然頻率較小音圈結果，頻率往右移增高的趨勢。
4. 樣品數不足，不能非常明顯區分鑄造好壞差異。

## II. 加工後之音圈：

如表2(b)為其頂面自然頻率及圖6所示，其中圖6僅為良品之試件綜合討論分析如下：

1. 頂面  $H_{a1}$ ：
  - 重疊吻合性很高，與圖 5(a)相比 350Hz 之模態未見，動態範圍在 80dB 左右。
2. 葉片  $H_{b1}$ ：
  - 在第一個反共振點出現有兩種，一在 1kHz 左右，一在 600Hz 左右。
  - HB1 對葉片部分對應重疊性不佳，可以了解葉片鑄造出來特性較不一致導致之影響。
  - 由實驗結果沒有不良品，當無法斷定區別良品與不良品之差別。
3. 環型部份  $H_{c1}$ ：
  - 當頻率小於 2kHz 各試件重疊吻合度極較一致，頻率大於 2kHz 變化較多，可能為高頻模態鑄件幾何尺寸變異交互影響較大所致。
  - 表 2(b)頂面之頻率值在 2kHz 以內，頻率值都在 1kHz 以上為葉片振型。

## III. 包含線圈之音圈：

如表2(c)為其頂面自然頻率及圖7所示左邊為良品的頻率響應函數圖形，右邊為不良品圖形的頻率響應函數，綜合討論分析如下：

1. 頂面部份  $H_{a1}$ ：
  - 圖 7(a)左圖為良品，右圖為不良品，頂面部份的頻率響應函數相當一致，C3、C4 為不良品，小峰值多很多模態出現，為葉片中有破

壞，葉片邊緣與環之間有損壞。

- 由圖 6(a)得知加工後音圈頂面之動態範圍為 80dB，在此含線圈之音圈降底為 60dB，此特性在控制器可控制性範圍內。
- 含線圈由圖 7(a)可看出不良品可控制性範圍在 80dB 明顯可知為葉片中有破壞，葉片邊緣與環之間有損壞所致。

#### 2. 葉片部份 $H_{b1}$ ：

- 表 2(c)中可之在 2000Hz 以內以之前分析結果得之 1200~1700Hz 為其葉片模態。圖 7(b)葉片部份良品的 FRF 重疊性良好但圖形較頂面些許差異為 C2 葉片部黏加上長型板片所致，只有不良品的響應較差為葉片中有破壞，葉片邊緣與環之間有損壞。

#### 3. 環型部份 $H_{c1}$ ：

- 圖 7(c)下環部分，不良品頻率響應函數多了許多峰值，可能為葉片中有破壞，葉片邊緣與環之間有損壞的峰值，造成結構較弱。

### IV. 不同音圈分析結論：

針對以上鑄造、加工後、包含線圈之音圈之自然頻率與頻率響應函數分析結果綜合討論分析如下：

1. 由以上三個層次的分析結果，有機會由音圈之頻率響應函數特性，判斷音圈好壞的差別。
2. 目前樣品數的不足的部分，需長期建立資料庫(資料庫)方式來改善。
3. 利用建立品質標準作業流程，得到音圈的頻率響應函數資料庫，確切建立音圈好壞的標準依據。
4. 現階段鑄造、加工後之音圈的量測不做是可以，但包含線圈之音圈原則上必須做，以達到音圈出廠品質的檢驗與資料庫資料的建立。

### 建議建立標準作業流程

針對建議建立音圈之標準作業流程作詳細說明，圖8所示為標準作業流程SOP流程圖，從圖中可知，為由鑄造、加工後、包含線圈等流程等三個階段，此三個階段都先由產品編號，再分為目視及音圈FRF量測篩選是否接受或剔除，音圈FRF量測需建立檔案庫到最後完成成品。

#### I. 第一階段鑄造音圈：

先建立鑄造編號、以代號A區分，代號後面的數目為其各別情況的編號，用來代表各種樣品數目，首先利用目視剔除不良品，若是目視無法觀察判斷，保留此產品利用振動特性，採用分析音圈之頻率響應函數量測判斷協助目視是否為良品與否，進行篩選若為良品則到第二階段加工後音圈，若為不良品則剔除。

音圈之頻率響應函數量測部分，訊號分析儀的設定方面，將頻寬設定為5kHz(原則上2kHz到5kHz

之間較理想)，解析調數為8192條，平均敲擊次數為3次，透過SCSI介面連接至個人電腦。實驗量測訊號並非是完整的週期訊號，訊號經由頻譜分析儀做快速傅立葉轉換後會有洩漏的情形產生，所以要在驅動器及感測器加上加權函數，減少訊號的洩漏情形。衝擊錘需要加上暫態加權函數，加速度計則需要加上對數加權函數。以衝擊錘固定敲擊1位置如圖4所示，分別得到圖上A、B、C的位置之頻率響應函數( $H_{ij}$ )，其中*i*=A、B、C為輸出的位置；*j*=1為輸入的位置。

得到的檔案庫檔案資料類型有數值與圖形二個部份，首先試件代號A得到來編號，如A1、A2、A3、A4等等視試件決定，如A2- $H_{a1}$ 、A2- $H_{b1}$ 、A2- $H_{c1}$ 分別為2號試件頂面、葉片、環之頻率響應函數，可以用繪圖軟體如EXCEL或GRAPHER等繪圖軟體繪製，得到頻率響應函數做為可控制性中其動態範圍大小的依據。另一個為將得到之頻率響應函數透過ME'scope軟體作曲線嵌合分析，來得到自然頻率為數值部份可由EXCEL來整理歸類，得到自然頻率做為數值大小誤差的依據；圖形部份為頻率響應函數圖形，

#### II. 第二階段加工後音圈：

先建立加工後音圈編號、以代號B區分，代號後面的數目為其各別情況的編號，用來代表各種樣品數目，先用目視剔除不良品，若是目視無法觀察判斷，保留此產品利用振動特性，採用分析音圈之頻率響應函數(FRF)量測判斷協助目視是否為良品與否，進行篩選若為良品則到第三階段包含線圈音圈，若為不良品則剔除。實驗量測如同第一階段方式，得到的檔案庫，首先試件代號B得到來編號，如B1、B2、B3、B4等等視試件決定，B4- $H_{a1}$ 、B4- $H_{b1}$ 、B4- $H_{c1}$ 分別為4號試件頂面、葉片、環之頻率響應函數，透過ME'scope軟體作曲線嵌合分析，來得到自然頻率。

#### III. 第三階段包含線圈音圈：

先建立包含線圈音圈編號、以代號C區分，代號後面的數目為其各別情況的編號，用來代表各種樣品數目，首先利用目視剔除不良品，若是目視無法觀察判斷，保留此產品利用振動特性，採用分析音圈之頻率響應函數量測判斷協助目視是否為良品與否，進行篩選若為良品則移至到激振器上組裝，若為不良品則剔除。實驗量測如同第一階段方式。得到的資料庫，首先試件代號C得到來編號，如C1、C2、C3、C4、C5等等視試件決定，如C5- $H_{a1}$ 、C5- $H_{b1}$ 、C5- $H_{c1}$ 分別為5號試件頂面、葉片、環之頻率響應函數，透過ME'scope軟體作曲線嵌合(curve-fitting)分析，來得到自然頻率。

### 結論與建議

本文建立標準作業流程，利用建立的產品的健康履歷表模式，追蹤產品從一開始製作到加工至最

後為完成品，到最後組裝完成後，給予一個獨立產品編號，做為產品後續追蹤之用，利用振動特性分析判斷協助目視是否為良品與否，做為品質改善為特性，並建立所有產品振動特性資料，找出激振器音圈的特性狀態記錄之做為往後參考的依據。以下是針對建立的品質檢驗流程建立的優缺點作分析討論如下：

### I. 優點：

1. 確切掌控產品品質，全程品質檢驗。
2. 減少成本浪費。
3. 產品追蹤之用。
4. 減少人工目視缺失。

### II. 缺點：

1. 增加人工工時。
2. 必須建立資料庫資料庫整理。
3. 初起會有較高的成本，但若建立之後，不良品剔除，全程檢查可達最大效益，生產成本可大為減少。
4. 購買所需儀器，初期成本會增加。

最後建議建立鑄造、加工、包含線圈之音圈標準作業流程，以線圈分析為主最重要，但要考慮到成本分析，評估成本的考量，是否對公司品質形象的建立，未來可應用於工廠加工檢驗方法，免除不良品產生。

### 誌謝

本研究承蒙國科會計畫與金頓科技股份有限公司經費支助，特以誌謝。國科會計畫編號NSC 92-2622-E-020-004-CC3。

### 參考文獻

1. 許中平、黃煌嘉 編譯，1989，線型伺服電動機，全華科技圖書股份有限公司，台北。
2. 曹昭陽，2001，電動馬達與控制，五南圖書出版公司，台北。
3. Boldea, I., and Nasar, S. A., 1999, "Linear Electric Actuators and Generators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 14, pp. 712-717.
4. Li, Z., Varlow, B. R., and Renforth, L. A., 2000, "Optimal Design of Autorecloser Electromagnetic Actuator," *IEE Proceedings, Electric Power Applications*, Vol. 147, pp. 431-435.
5. Rajanathan, C. B., Shi, Z. W., and Sapeluk, A. T., 1999, "Design and Control of an Electromagnetic Actuator Without Mechanical Springs," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 14, pp. 643-648.
6. Sidell, N., and Jewell, G. W., 1999, "The Design and Construction of a High Temperature Linear Electromagnetic Actuator," *Journal of Applied Physics*, Vol. 85, No. 8, pp. 4901-4903.

7. Skrodzka, E. B., and Aleksander, P. S., 2000, "Comparison of Modal Parameters of Loudspeakers in Different Working Conditions," *Applied Acoustics*, Vol. 60, pp. 267-277.
8. Koh, C. S., and Mohammed, O. A., 1994, "Optimum Design of Voice Coil Motor With Constant Torque Coefficients Using Evolution Strategy," *Journal of Applied Physics*, Vol. 75, No. 10, pp. 6045-6047.
9. Honda, T., and Yamasaki, J., 1998, "Fabrication of a Micromotor Driven by Electromagnetic Vibration," *Journal of Applied Physics*, Vol. 83, No. 11, pp. 7115-7117.
10. So, E. C. T., and Yang, S. J., 1993, "Calculation of Stator Radial Vibration for a Hybrid Stepping Motor Using 3D Finite element Method," *Journal of Applied Physics*, Vol. 73, No. 10, pp. 6799-6801.
11. Hong, C. G., and Hwang, G. J., 1987, "Numerical Analysis of Magnetic Field Distribution in an Air Gap with the Effect of Armature Reaction," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 10, No. 2, pp. 129-137.
12. B ö hm, S., Burger, G. J., Korthorst, M. T., and Roseboom, F., 2000, "A Micromachined Silicon Valve Driven by a Miniature Bi-Stable Electro-Magnetic Actuator," *Sensors and Actuators*, Vol. 80, pp. 77-83.
13. Gollee, R., Roschke, T., and Gerlach, G., 1999, "A Finite Element Method Based Dynamic Analysis of a Long-Stroke linear Actuator," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 196, pp. 943-945.

## Development and Validation of Quality Inspection Method for Voice Coil Structure of Shaker

Bor-Tsuen Wang, Cheng-Huang Lin  
Department of Mechanical Engineering  
National Pingtung University of Science and  
Technology  
David Lee  
King Design Company  
NSC 92-2622-E-020-004-CC3

### Abstract

This work adopts experimental modal analysis (EMA) to establish quality inspection method and criteria for different manufacturing stages, including casting part, cutting part, and coiled part of voice coil structures. First, the defected parts can be screened out by visual inspection. For those unidentified parts, the vibration characteristics can then be experimentally measured and recorded to determine if they are defected or not. The quality inspection method base on vibration measurement is developed and recommended to provide a quantity database for voice coil structures. Results

show that the developed methodology can be feasible for practical quality assurance procedures. The established vibration characteristic database can not only be used for quality check but also be useful for future design modification.

Keywords: Experimental Modal Analysis, Voice-Coil, Standard Operation Procedure

表 1、音圈樣品總表

	Case	情況	備註
鑄造	A1	良品	—
	A2	良品	—
	A3	不良品	葉片中有破壞， 葉片邊緣與環之間有損壞
加工後	B1	良品	—
	B2	良品	葉片加長型墊片
	B3	良品	—
	B4	良品	—
	B5	良品	—
包含線圈	C1	良品	—
	C2	良品	葉片部黏加上長型板片
	C3	不良品	葉片中有破壞， 葉片邊緣與環之間有損壞
	C4	不良品	葉片中有破壞

表 2、各不同音圈之自然頻率

(a) 鑄造頂面  $H_{A,1}$

MODE	A1(Good) Hz	A2(Good) Hz	A3(No Good) Hz
1	336.90	345.08	333.93
2	—	345.25	—
3	1254.80	—	1244.40
4	—	—	1253.20
5	2015.80	—	—
6	2075.50	2071.20	2064.20

(b) 加工後頂面  $H_{A,1}$

MODE	B1(Good) Hz	B2 (Good) Hz	B3(Good) Hz
1	—	—	1247.80
2	—	1364.50	—
3	1414.00	1414.00	—
4	—	1486.30	—
5	1576.40	1581.40	—
6	1613.60	1593.20	1599.60
7	—	1641.00	1633.00
8	—	1704.50	—
9	2113.70	2086.80	2045.50

表 2、各不同音圈之自然頻率(續)

(c) 包含線圈頂面  $H_{A,1}$

MODE	C1(Good) Hz	C2(Good) Hz	C3(No Good) Hz	C4(No Good) Hz
1	—	—	156.25	—
2	—	—	177.33	—
3	—	—	208.75	—
4	—	—	252.11	259.08
5	286.55	—	271.74	—
6	—	319.39	358.90	—
7	—	—	521.81	—
8	—	—	586.25	—
9	—	—	684.36	—
10	—	—	739.18	—
11	—	—	813.47	—
12	—	—	875.22	853.43
13	—	—	938.58	929.32
14	—	—	972.55	—
15	—	—	976.80	—
16	—	—	1010.10	—
17	—	—	1062.50	—
18	—	—	1062.20	—
19	—	—	1124.30	—
20	—	—	1131.60	1132.50
21	—	—	1172.90	—
22	—	—	1177.10	—
23	—	—	1203.40	—
24	1279.50	—	1240.60	1242.40
25	1284.60	—	1301.80	1296.10
26	—	—	1304.60	—
27	1383.10	1397.90	1319.30	—
28	1420.50	1463.50	1481.80	1452.30
29	1539.30	1506.30	1722.30	—
30	1740.90	1777.60	1740.20	1759.30
31	—	—	1912.80	—
32	—	—	2055.30	2100.60
33	2245.80	2289.70	—	—



(a) 內部固定方式



(b) 加上平台

圖 1、激振器實體圖



(a) 鑄造



(b) 加工後



(c) 包含線圈

圖 2、不同製程階段音圈實體圖

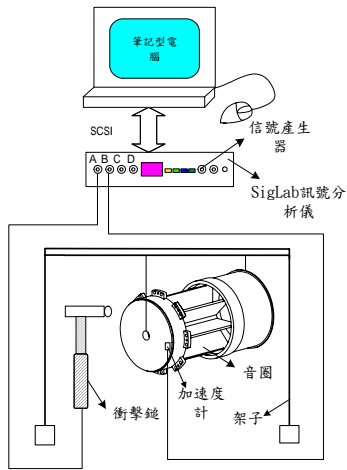


圖 3、結構特性分析之實驗架構圖

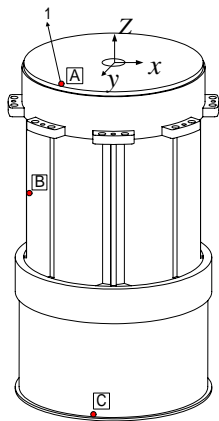
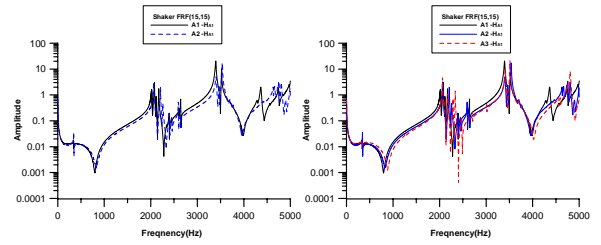
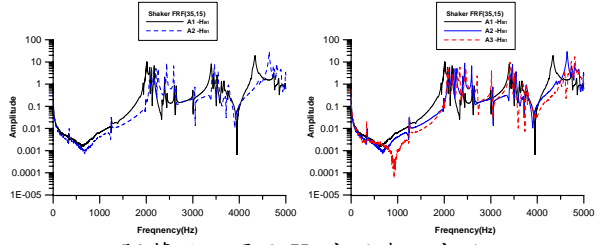


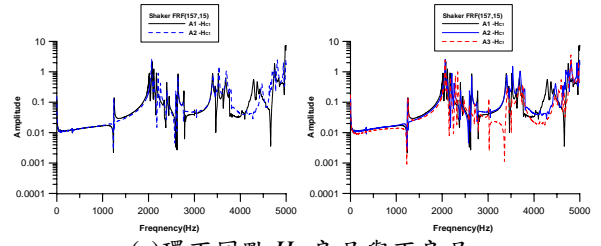
圖 4、實驗量測位置示意圖



(a) 頂面同點  $H_{ii}$  良品與不良品

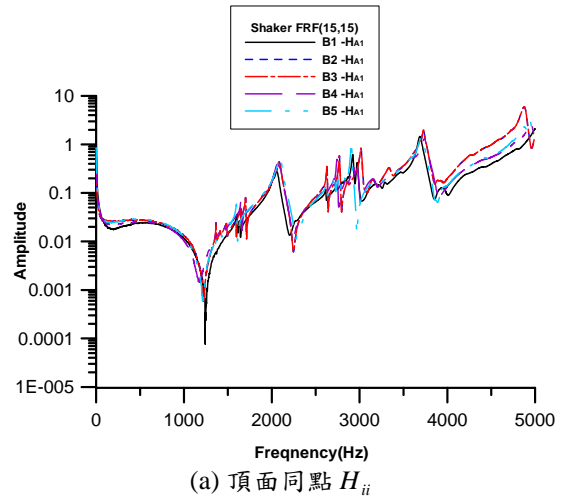


(b) 葉面不同點  $H_{ij}$  良品與不良品



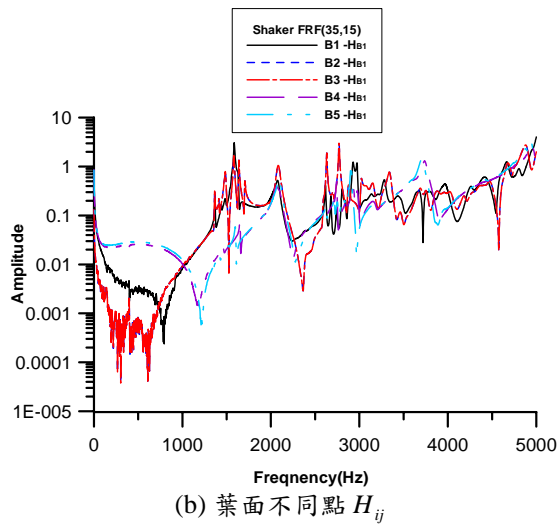
(c) 環不同點  $H_{ij}$  良品與不良品

圖 5、鑄造激振器之頻率響應函數

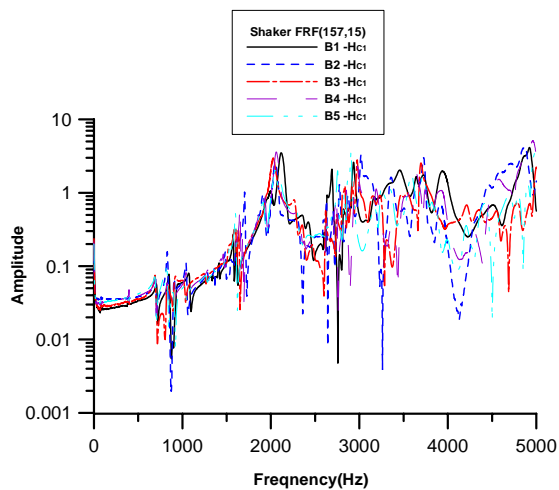


(a) 頂面同點  $H_{ii}$

圖 6、加工後激振器之頻率響應函數

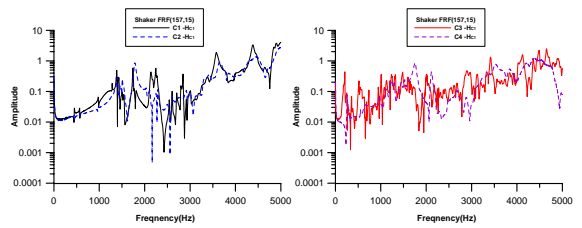


(b) 葉面不同點  $H_{ij}$



(c) 環不同點  $H_{ij}$

圖 6、加工後激振器之頻率響應函數(續)



(c) 環良品與不良品

圖 7、包含線圈激振器之頻率響應函數(續)

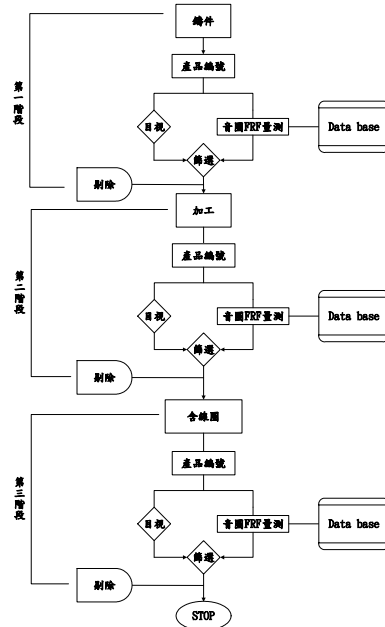
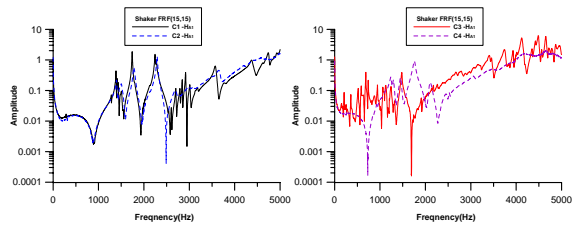
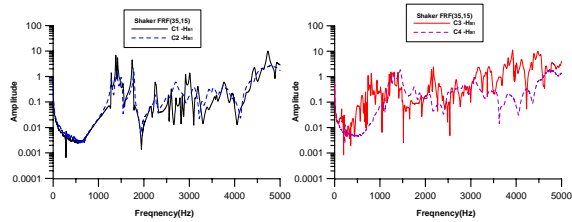


圖 8、標準作業流程SOP流程圖



(a) 頂面良品與不良品



(b) 葉面良品與不良品

圖 7、包含線圈激振器之頻率響應函數