



工具機主軸製程管制系統與 損壞辨識系統開發

林威延博士

逸奇科技

系統架構



資料擷取模組

軟體

DAQ

感測器



特徵擷取模組

FFT-Based
Features

EMD-Based
Features

MSE-Based
Features

損壞辨識系統

損壞特徵
相似比對



製程管制系統

主軸履歷

製程站別

結構管理

組織權限

主軸型號管理

零組件資料庫

資料擷取模組與實驗架構



資料擷取模組架構

感測器

- Accelerometers
- Microphones
- Tachometers



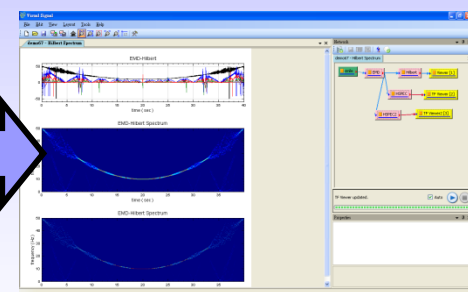
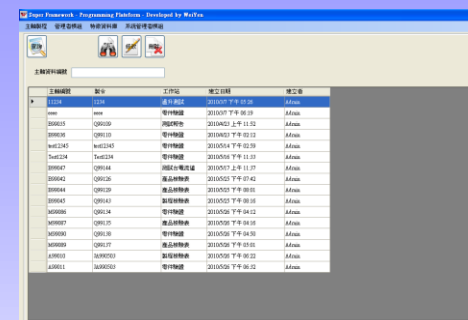
資料擷取卡

4 Simultaneous Inputs
24-bits A/D Converters
102 dB Dynamic Range
51.2k Sample Rate
+/- 5V Input Range

• USB 923X



軟體系統



- Visual Signal
- Developed by Microsoft .Net C#

軟體系統

Power

0.3

0.2

0.1

0

Super Framework - Programming Platform - Developed by WeiYen

主軸製程 管理者模組 特徵資料庫 系統管理者模組

確定 取消 修改

主軸編號:

問題描述:

測試日期: 0001/1/1 上午 12:00:00

Is Knowledgeware

Fourier Based Features EMD Based Features MSE Based Features

加入 移除 Excel Feature

實驗轉速	過零點速率	能量比值
400	3194.3760984182777	0.6279181359312952
400	1714.6651044717828	0.2350223725887404
400	909.8223003319664	0.0454079622580986
400	409.91993751220463	0.043994739651433357
400	184.96387424331186	0.047656789570432539

新增量測資料

使用者 Admin

Switch_m_m_m_m

ToReal_m_m_m_m

Connect To MES System

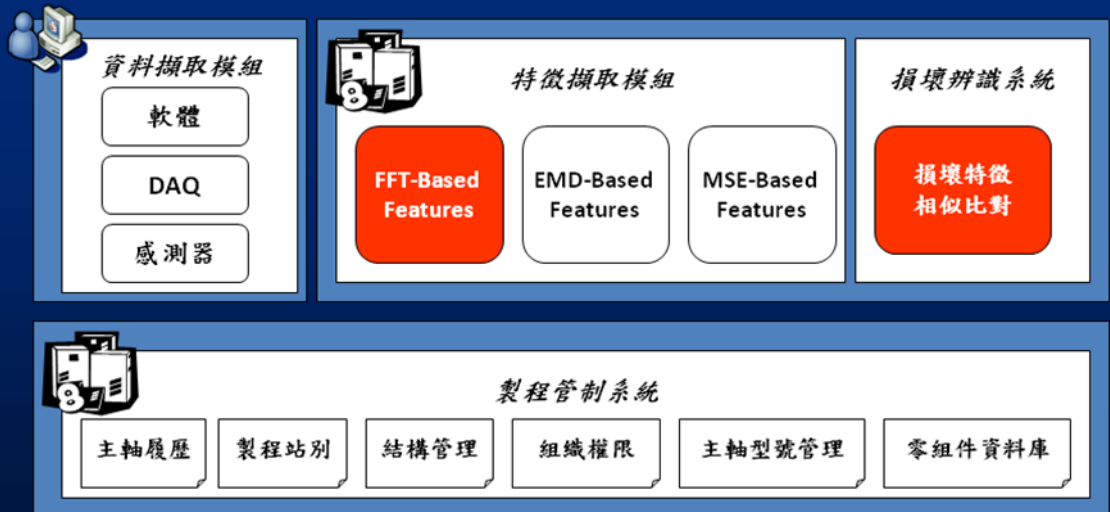
White default (750) 300 0 False

整合至
製程管制系統

年度主軸退修統計表

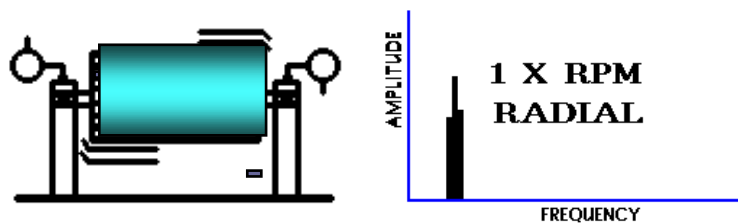
問題描述	數量	是否為本研究討論模型
軸承損壞	38	Y
電流相關問題	12	N
冷卻水水道阻塞	7	N
扭力不足	5	N
軸承潤滑不足	4	Y
軸心問題	3	Y
Sensor 問題	2	N
組裝瑕疵	1	Y
共振太大，軸心拆回重作動平衡.	1	Y
吐刀量不足	1	N

以FFT為基礎之特徵擷取 及比對演算法

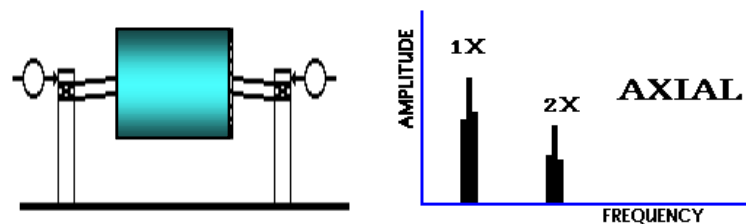


轉子系統問題

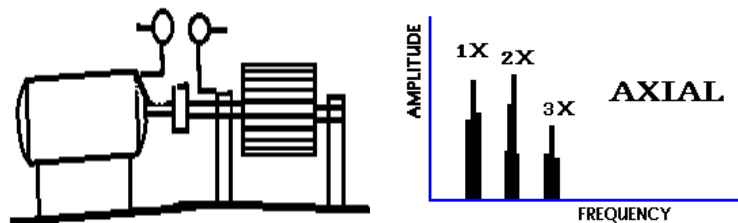
Unbalanced



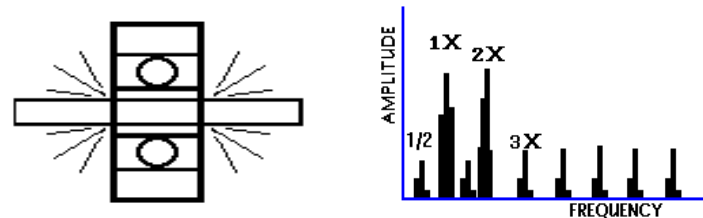
Bent Shaft



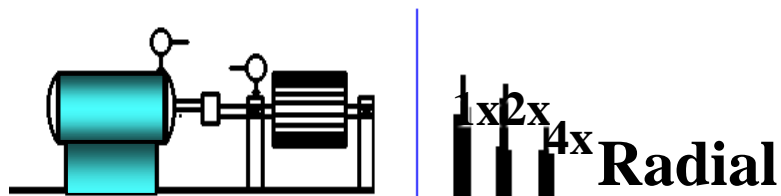
Angular Misalignment



Mechanical Looseness



Parallel Misalignment



透過傅立葉頻譜可以得到取得轉子系統問題的訊號特徵 [9]

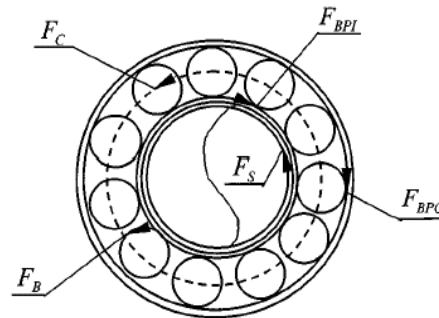
軸承磨損效應

$$\text{BPFO} = \frac{N \times n}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos\beta \right)$$

$$\text{BPFI} = \frac{N \times n}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos\beta \right)$$

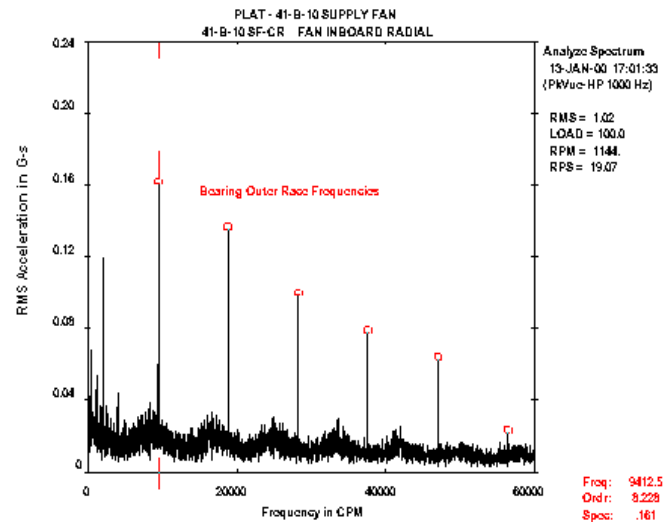
$$\text{BSF} = \frac{N}{2} \times \frac{D}{d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos\beta \right)^2 \right)$$

$$\text{FTF} = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos\beta \right)$$



透過包絡頻譜或是傅立葉頻譜可以得到取得軸承系統的訊號特徵 [9 - 14]

where N = Shaft Speed in Hz
 n = Number of Elements
 D = Pitch Diameter of Rolling Elements
 d = Rolling Element Diameter
 β = Contact Angle



本研究軸承損傷頻率

本研究使用軸承規格

	前軸承	後軸承
軸承型號	SKF 7010CE	SKF 7006CD
滾珠數量	21	14
軸承外徑	80 mm	55 mm
軸承內徑	50 mm	30 mm
寬度	16 mm	13 mm
接觸角	15°	15°
滾珠材料	陶瓷滾珠	陶瓷滾珠
ISO	4級	4級
安裝方式	背對背安裝	背對背安裝
預壓	輕預壓	輕預壓

軸承損傷頻率

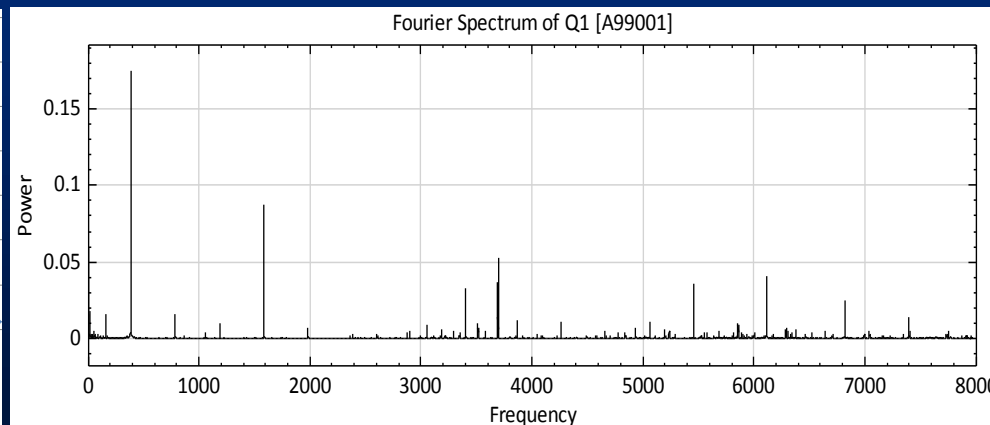
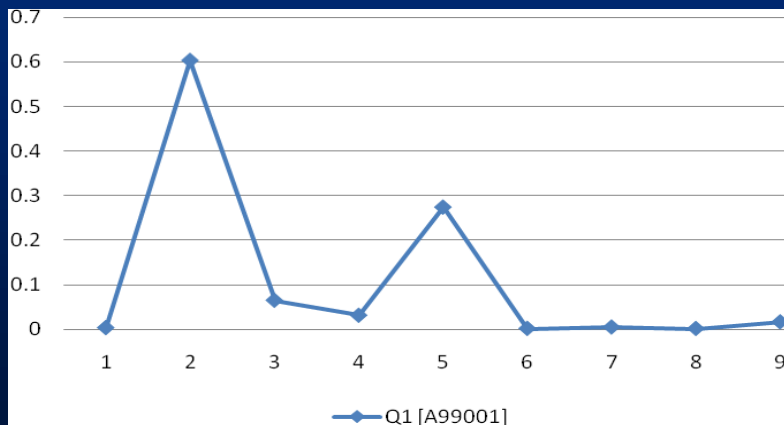
	前軸承 (SKF 7010CE)	後軸承 (SKF 7006CD)
外環損傷	8.316 xN	5.09 xN
內環損傷	12.684 xN	8.96 xN
滾珠損傷	2.22 xN	1.6 xN
保持器損傷	0.4 xN	0.36 xN

FFT能量分佈圖

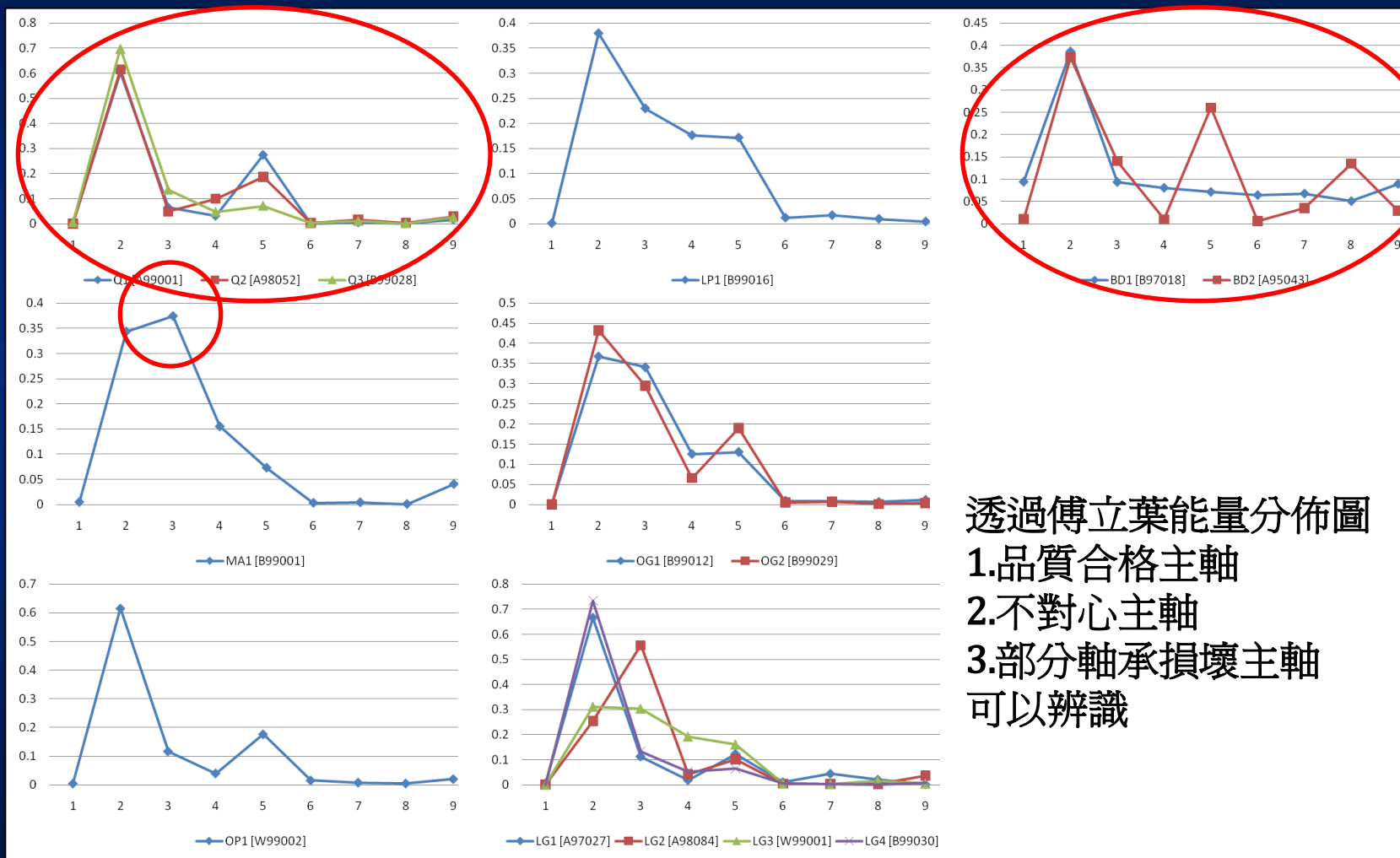
代號	特徵頻率敘述	頻率值	能量比值 (%)
1	0.5 倍頻	197.4015	0.003103
2	1 倍頻	398.4031	0.603745
3	2 倍頻	797.6062	0.064609
4	3 倍頻	1195.409	0.030957
5	4 倍頻	1593.212	0.273999
6	外環損傷頻率 (BPFO)	5450.227	0.001472
7	內環損傷頻率 (BPFI)	4942.639	0.004575
8	滾珠損傷頻率 (BSF)	22031.17	0.001331
9	保持器損傷頻率 (FTF)	176.0014	0.016209

Oil Whirling 問題 [9]

特徵向量



各損壞模型之FFT能量分佈圖



透過傅立葉能量分佈圖
 1.品質合格主軸
 2.不對心主軸
 3.部分軸承損壞主軸
 可以辨識

各損壞模型之FFT相關度矩陣

$$Cor(a,b) = \cos\theta = \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}}{\|\mathbf{a}\| \|\mathbf{b}\|} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i b_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n b_i^2}}$$

	BD1	BD2	LG1	LG2	LG3	LG4	LP1	MA1	OG1	OP1	Q1	Q2
BD1	-	0.87	0.94	0.60	0.81	0.93	0.89	0.80	0.84	0.94	0.90	0.93
BD2	0.87	-	0.88	0.65	0.82	0.83	0.88	0.76	0.84	0.91	0.93	0.89
LG1	0.94	0.88	-	0.57	0.77	0.99	0.87	0.77	0.82	0.99	0.97	0.98
LG2	0.60	0.65	0.57	-	0.87	0.58	0.79	0.93	0.91	0.59	0.53	0.51
LG3	0.81	0.82	0.77	0.87	-	0.77	0.98	0.97	0.98	0.80	0.77	0.78
LG4	0.93	0.83	0.99	0.58	0.77	-	0.86	0.78	0.82	0.98	0.94	0.97
LP1	0.89	0.88	0.87	0.79	0.98	0.86	-	0.94	0.97	0.90	0.88	0.89
MA1	0.80	0.76	0.77	0.93	0.97	0.78	0.94	-	0.99	0.78	0.72	0.74
OG1	0.84	0.84	0.82	0.91	0.98	0.82	0.97	0.99	-	0.85	0.80	0.80
OP1	0.94	0.91	0.99	0.59	0.80	0.98	0.90	0.78	0.85	-	0.99	0.99
Q1	0.90	0.93	0.97	0.53	0.77	0.94	0.88	0.72	0.80	0.99	-	0.99
Q2	0.93	0.89	0.98	0.51	0.78	0.97	0.89	0.74	0.80	0.99	0.99	-

以經驗模態拆解法EMD為基礎之 特徵擷取及比對演算法



資料擷取模組

軟體

DAQ

感測器



特徵擷取模組

FFT-Based
Features

**EMD-Based
Features**

MSE-Based
Features

損壞辨識系統

**損壞特徵
相似比對**



製程管制系統

主軸履歷

製程站別

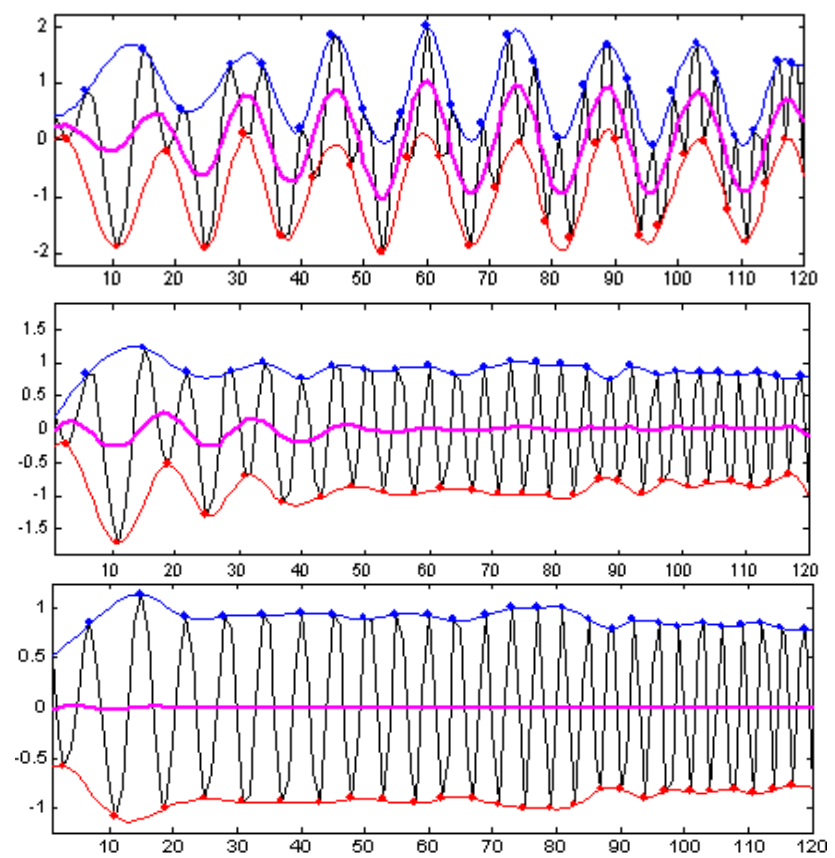
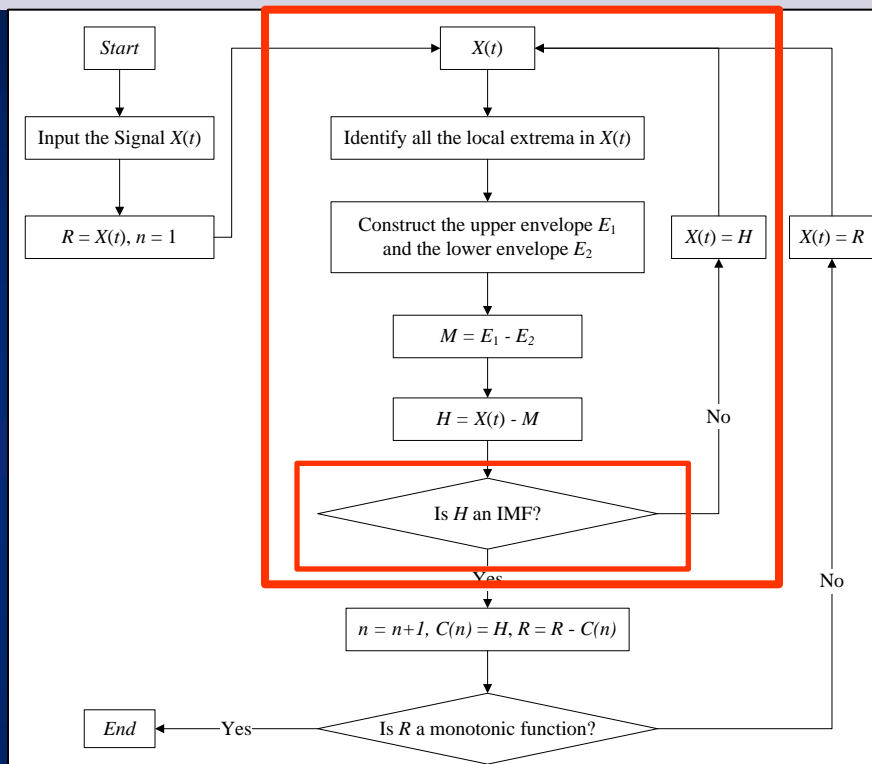
結構管理

組織權限

主軸型號管理

零組件資料庫

EMD演算法流程



1. 極值點數與過零點數數量相同或最多差一個。
2. 在任何點上，其包絡線的極大與極小值的均值為 0。
3. 每一個極值點一定是在兩個過零點中間。

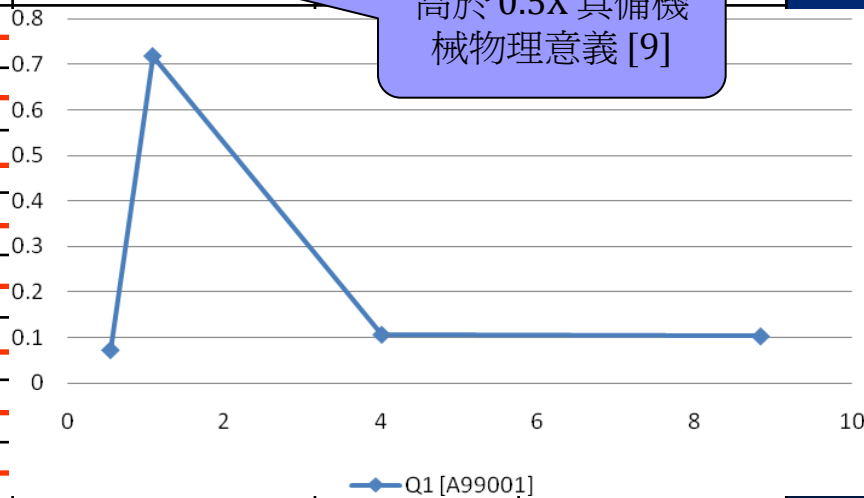
$$SD = \left\{ \sum_{t=0}^T \left[\frac{|h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t)|^2}{h_{1(k-1)}^2(t)} \right] \right\}^{1/2}$$

EMD階次能量圖 - Q1 [A99001]

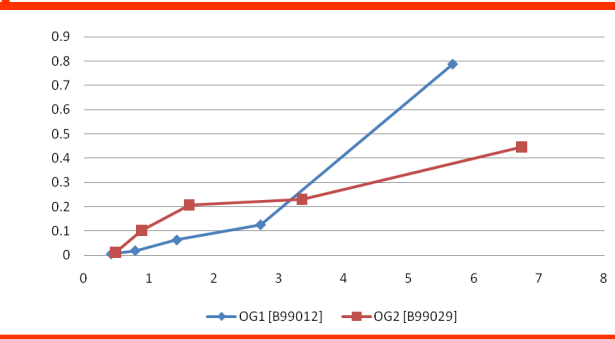
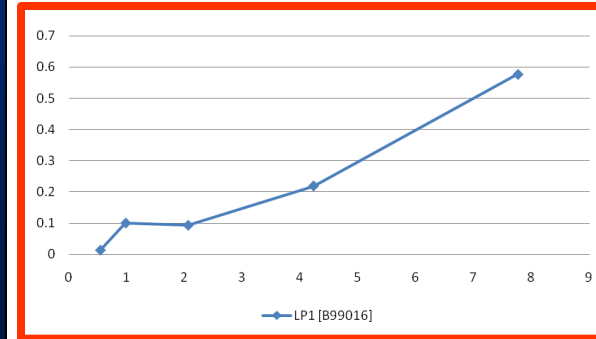
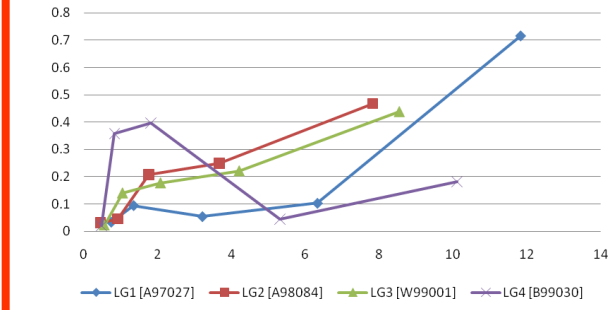
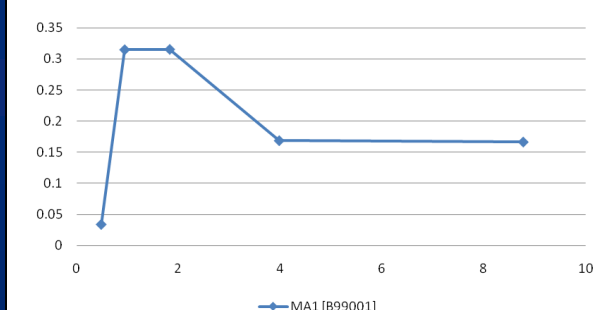
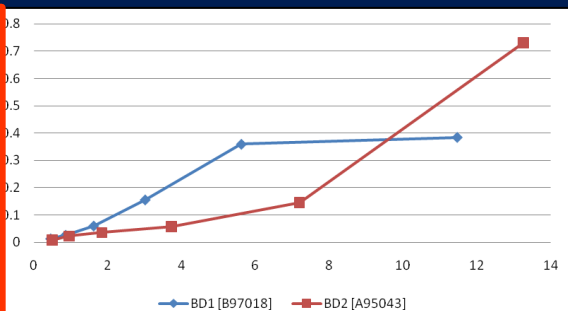
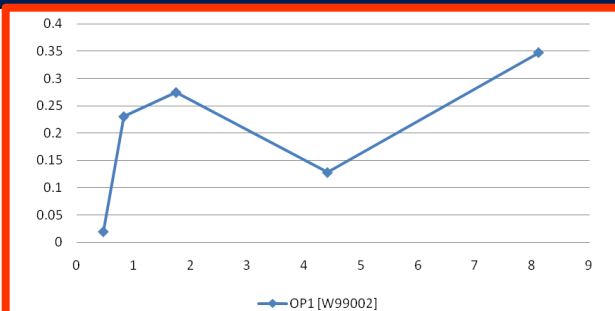
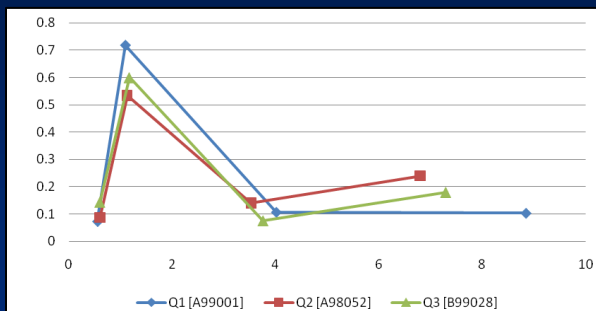
編號	過零速度	平均能量	是否為目標	階次	能量比
IMF1	15020.5	0.009	No	-	-
IMF2	6694.4	0.009	No	-	-
IMF3	3535.6	0.004	Yes	8.839	0.103121828
IMF4	1601.5	0.004	Yes	4.004	0.106713242
IMF5	432.5	0.027	Yes	1.081	0.71719583
IMF6	217.5	0.003	Yes	0.544	0.072969101
IMF7	119.8	0	No		
IMF8	54.9	0.001			
IMF9	24	0.001			
IMF10	11.3	0.001			
IMF11	5.3	0.001			
IMF12	3	0.001			
IMF13	1.3	0.003			
IMF14	0.6	0.004			
IMF15	0.1	0.001			

接合頻率 [7]

高於 0.5X 具備機械物理意義 [9]



各損壞模型之EMD階次能量圖



各損壞模型EMD 特徵向量相關度

$$SumAngle(Fv^1, Fv^2) = \sum_{i=1}^n \cos^{-1} \left(\frac{FvX_i^1 \times FvX_i^2 + FvY_i^1 \times FvY_i^2}{\sqrt{FvX_i^1{}^2 + FvY_i^1{}^2} \times \sqrt{FvX_i^2{}^2 + FvY_i^2{}^2}} \right)$$

	BD1	BD2	LG1	LG2	LG3	LG4	LP1	OG1	OP1	Q1	Q2
BD1	-	4.13	0.44	0.56	0.52	0.40	0.53	0.56	0.44	0.23	0.24
BD2	4.13	-	0.45	0.56	0.53	0.41	0.53	0.53	0.44	0.24	0.25
LG1	0.44	0.45	-	2.05	2.97	0.79	1.87	1.32	2.03	0.36	0.38
LG2	0.56	0.56	2.05	-	3.67	1.02	2.31	2.79	1.51	0.36	0.38
LG3	0.52	0.53	2.97	3.67	-	0.93	4.58	2.34	2.55	0.40	0.42
LG4	0.40	0.41	0.79	1.02	0.93	-	0.86	0.92	0.76	0.29	0.30
LP1	0.53	0.53	1.87	2.31	4.58	0.86	-	3.14	1.87	0.41	0.45
OG1	0.56	0.53	1.32	2.79	2.34	0.92	3.14	-	1.32	0.38	0.41
OP1	0.44	0.44	2.03	1.51	2.55	0.76	1.87	1.32	-	0.43	0.46
Q1	0.23	0.24	0.36	0.36	0.40	0.29	0.41	0.38	0.43	-	5.26
Q2	0.24	0.25	0.38	0.38	0.42	0.30	0.45	0.41	0.46	5.26	-

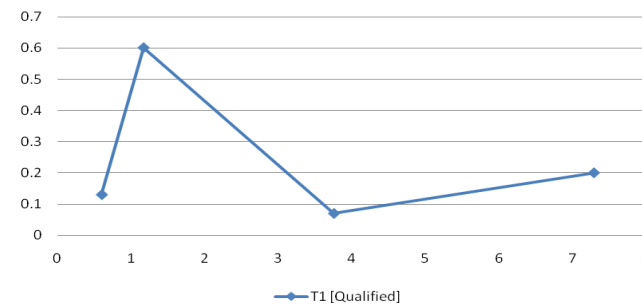
系統可靠度測試

樣本	樣本狀態	比對診斷結果 [主軸編號, 狀態, 相似度值]
Q1	Qualified	[Q2, Qualified, 5.26]
Q2	Qualified	[Q1, Qualified, 5.26]
LG1	Less-Grease	[LG3, Less-Grease, 2.97], [LG2, Less-Grease, 2.05]
LG2	Less-Grease	[LG3, Less-Grease, 3.67]
LG4	Less-Grease	[LG2, Less-Grease, 1.02], [LG3, Less-Grease, 0.93]
BD1	Bearing Defect	[BD2, Bearing Defect, 4.13]
BD2	Bearing Defect	[BD1, Bearing Defect, 4.13]

樣本測試

T1 [Qualified]

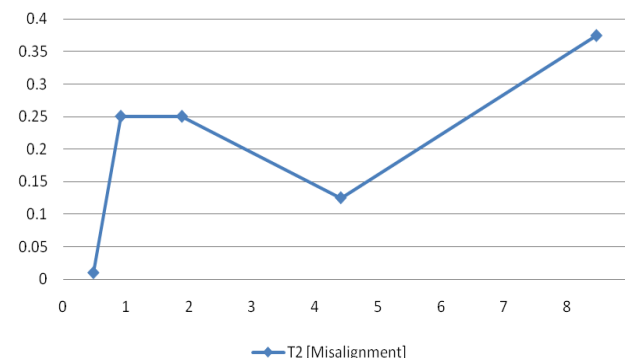
Index	階次	能量比值	過零速度
IMF3	7.28075	0.2	2912.3
IMF4	3.74925	0.07	1499.7
IMF5	1.16225	0.6	464.9
IMF6	0.595	0.13	238



Q1	Q2	MA1	LP1	OP1	LG1	LG2	LG3	LG4	OG1	BD1	BD2
5.46	17.64	0.49	0.44	0.46	0.38	0.38	0.42	0.51	0.41	0.24	0.25

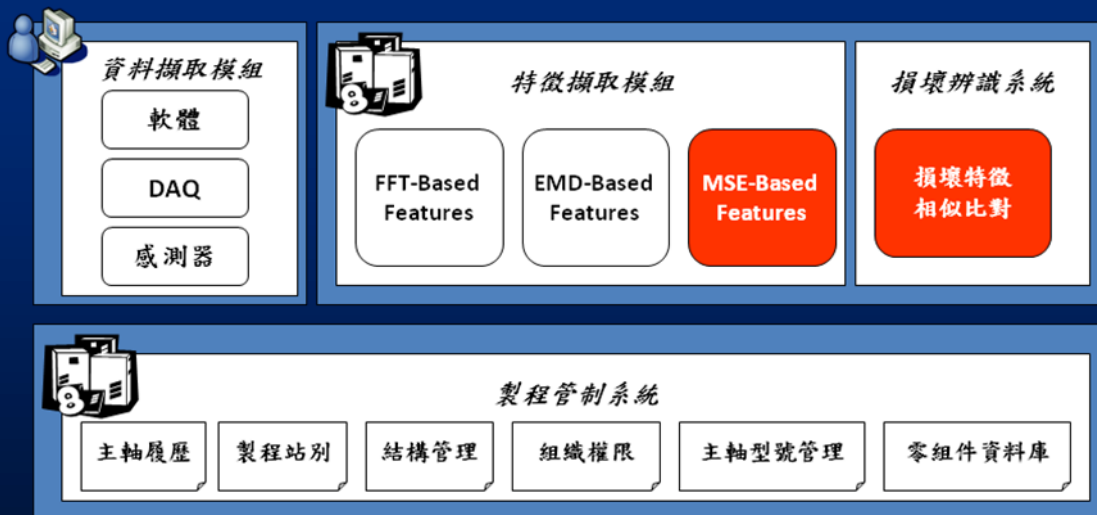
T2 [Misalignment]

Index	階次	能量比值	過零速度
IMF3	8.4525	0.374	3381
IMF4	4.3993	0.125	1759.7
IMF5	1.8803	0.25	752.1
IMF6	0.9113	0.25	364.5
IMF7	0.4763	0.01	190.5

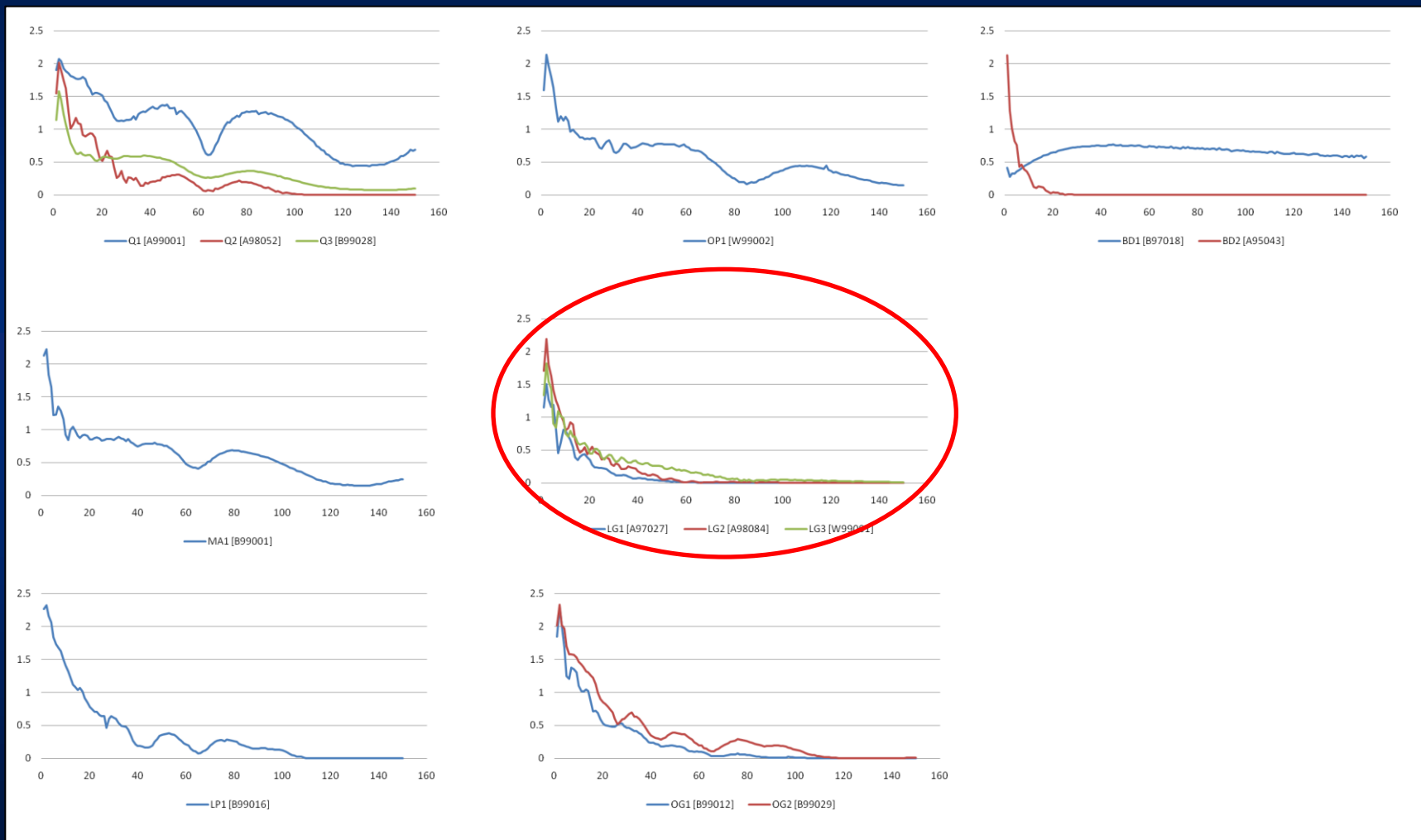


BD1	BD2	LG1	LG2	LG3	LG4	LP1	MA1	OG1	OP1	Q1	Q2
0.44	0.46	1.62	1.35	2.14	0.76	2.29	11.10	1.34	5.96	0.46	0.49

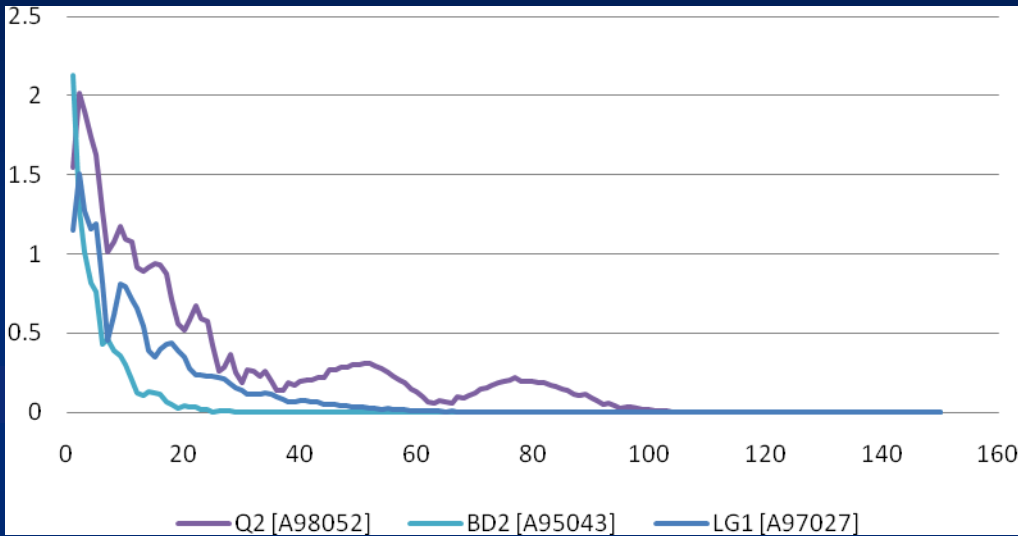
以多尺度熵MSE為基礎之特徵擷取 及比對演算法



各損壞模型之 MSE 分佈圖



結果比較



	Q2 [A98052]	LG1 [A97027]	BD2 [A95043]
線下面積	38.444	18.247	9.066
End Scale	96	50	21
平均值	0.256	0.122	0.06
標準差	0.399	0.273	0.242

各損壞模型 MSE 特徵向量相關度

$$Cor(a,b) = \cos\theta = \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}}{\|\mathbf{a}\| \|\mathbf{b}\|} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i b_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n b_i^2}}$$

	BD1	BD2	LG1	LG2	LG3	LP1	MA1	OG1	OG2	OP1	Q1	Q2
BD1	-	0.145	0.305	0.344	0.516	0.496	0.821	0.410	0.537	0.804	0.909	0.457
BD2	0.145	-	0.838	0.838	0.754	0.762	0.568	0.792	0.713	0.565	0.405	0.767
LG1	0.305	0.838	-	0.984	0.938	0.948	0.733	0.967	0.930	0.765	0.614	0.963
LG2	0.344	0.838	0.984	-	0.965	0.964	0.776	0.986	0.949	0.794	0.650	0.967
LG3	0.516	0.754	0.938	0.965	-	0.979	0.882	0.986	0.981	0.902	0.779	0.973
LP1	0.496	0.762	0.948	0.964	0.979	-	0.874	0.982	0.993	0.872	0.780	0.985
MA1	0.821	0.568	0.733	0.776	0.882	0.874	-	0.822	0.895	0.959	0.970	0.844
OG1	0.410	0.792	0.967	0.986	0.986	0.982	0.822	-	0.977	0.836	0.705	0.975
OG2	0.537	0.713	0.930	0.949	0.981	0.993	0.895	0.977	-	0.892	0.813	0.980
OP1	0.804	0.565	0.765	0.794	0.902	0.872	0.959	0.836	0.892	-	0.929	0.856
Q1	0.909	0.405	0.614	0.650	0.779	0.780	0.970	0.705	0.813	0.929	-	0.751
Q2	0.457	0.767	0.963	0.967	0.973	0.985	0.844	0.975	0.980	0.856	0.751	-

製程管制系統與 損壞辨識系統開發



主軸製程管制系統使用案例

- 動平衡檢測
- 溫升跑合
- RMS 震動值

- 主軸履歷
- 零件驗證
- 組織權限
- 製程站別
- 結構管理
- 型號管理



2. 記錄現有品質檢測指標



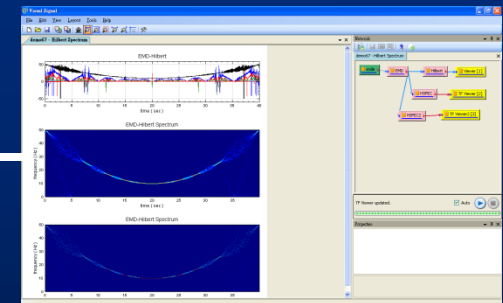
1. 記錄所有製程參數



➢ 零件驗證和主軸履歷資料建立

3. 量測震動訊號並進行進階分析

➢ 資料擷取模組



製程管制系統使用者介面

The interface displays three overlapping windows for different models:

- Top Window (Standard Model):** Shows '模組名稱' (Model Name) as 'Standard Model'.
- Middle Window (Short Model):** Shows '模組名稱' (Model Name) as 'Short Model'.
- Bottom Window (123-軸承):** Shows a parts list table and a detailed specification table.

Parts List Table (Bottom Window):

名稱	零件類型敘述	零件敘述
軸心	Axis-軸心	
▶ 前軸承 1	Bearing-軸承	123-軸承
前軸承 2	Bearing-軸承	1234-軸承
後軸承 1	Bearing-軸承	8888888888-軸承
後軸承 2	Bearing-軸承	
前軸座	Front Axis Base-軸座	
後軸座	Front Axis Base-軸座	

Specifications Table (Bottom Window):

名稱	值
▶ 內徑公差	1
外徑公差	2
直徑	0
滾珠直徑	0
滾珠數量	0
接觸角	0

根據不同的模組，產生不同的製程工作站

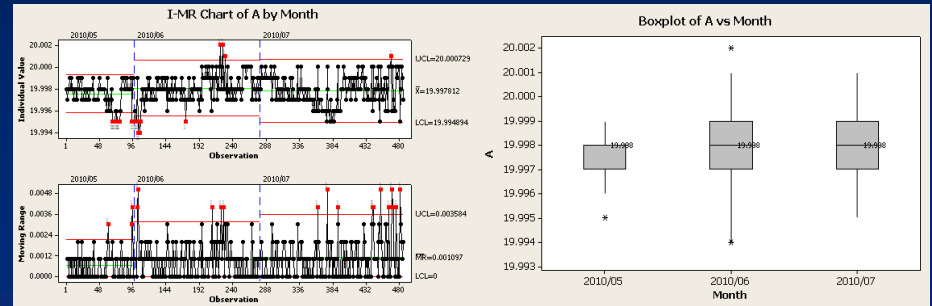
在主軸組裝過程，即輸入必要資訊

製程管制系統效益 (1)

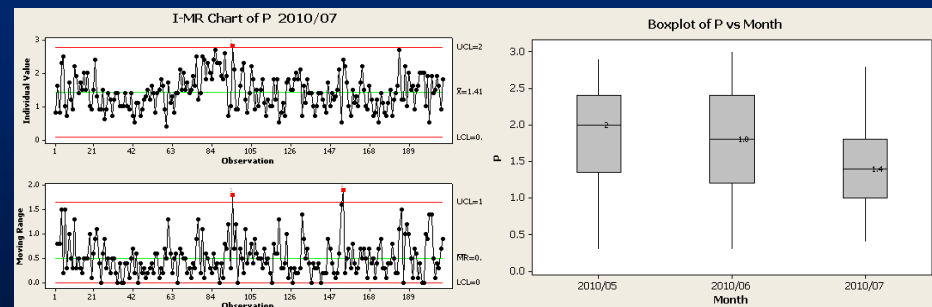
製程檢驗表

潤滑				
6	基本資料			
7	主軸料號: M99090	型令: Q99138	日期: 2010-08-23T17:	
10	技術規格			
11	簽字轉速: 18000	極數: 2	刀把型式: SK-30	
12	潤滑: Oil-Mist	馬力: 10	冷卻型式: Air	
13	電壓: 380	換刀: Auto	軸承型式: Steel	
16	組立尺寸配合規格			
17	心軸:	編號:	前軸承:	
18			後軸承:	
19	前軸承座:	編號:	孔徑尺寸:	
20	後軸承座:	編號:	孔徑尺寸:	
22	軸承公差資料記錄表			
23	HSE-63F	內徑公差	後軸承1	後軸承2
24	10HP	外徑公差		
27	軸心餘孔偏置測試			
28	編碼量C:	mm	合格值: C ≤ 0.03mm	
30	拉刀力測試			
31	拉刀力:	Nt	合格值: ≥ 4000N (SK-30)	
32			合格值: ≥ 11000N (HSE-63F)	
34	拉刀檢知測試			
36	吐刀量測試			
37	e. p:	mm	合格值: 0.55 - 0.60 mm	
39	平衡等級測試 轉速: 4000rpm			

零件公差六個標準差統計報表



震動值六個標準差統計報表



製程管制系統效益 (2)

在製品監控管理

Super Framework - Programming Platform - Developed by WeiYen

主軸製程 管理者模組 特徵資料庫 系統管理者模組

查詢 修改 刪除

主軸資料編號: B99 主軸製令: 建立者:

Model: 建立日期: 1753年 1月 1日 至 9998年12月31日

	主軸編號	製令	工作站	建立日期	建立者
1	B99057	JA990528	後軸承組裝	2010/6/23 下午 05:06	劉家豪
2	B99059	JA990528	零件驗證	2010/6/23 下午 06:37	張祐達
3	B99058	JA990528	後軸承組裝	2010/6/23 下午 05:31	張祐達
4	B99061	Q99169	零件驗證	2010/7/22 上午 10:21	劉家豪
5	B99062	Q99170	溫升測試	2010/7/22 上午 10:28	劉家豪
6	B99072	Q99223	溫升測試	2010/8/9 下午 05:07	劉家豪
7	B99071	Q99222	產品檢驗表	2010/8/9 下午 04:52	劉家豪
8	B99064	Q99172	產品檢驗表	2010/8/10 上午 10:52	劉家豪
9	B99065	Q99221	產品檢驗表	2010/8/10 上午 11:01	劉家豪
10	B99068	Q99301	溫升測試	2010/8/11 下午 07:18	林進輝
11	B99069	Q99331	零件驗證	2010/8/11 下午 07:30	林進輝
12	B99070	Q99332	零件驗證	2010/8/11 下午 07:58	林進輝
13	B99035	Q99109	測試報告	2010/4/23 上午 11:52	Admin
14	B99036	Q99110	基本資料	2010/4/23 下午 02:12	Admin
15	B99042	Q99126	溫升測試	2010/5/25 下午 07:42	Admin
16	B99044	Q99129	產品檢驗表	2010/5/25 下午 08:01	Admin
17	B99045	Q99143	製程檢驗表	2010/5/25 下午 08:16	Admin
18	B99047	Q99144	測試台電流值	2010/5/17 上午 11:37	Admin

查詢主軸製程 使用者 Admin

人員工作狀態

Super Framework - Programming Platform - Developed by WeiYen

主軸製程 管理者模組 特徵資料庫 系統管理者模組

查詢 修改 刪除

主軸資料編號: 主軸製令: 建立者: 劉家豪

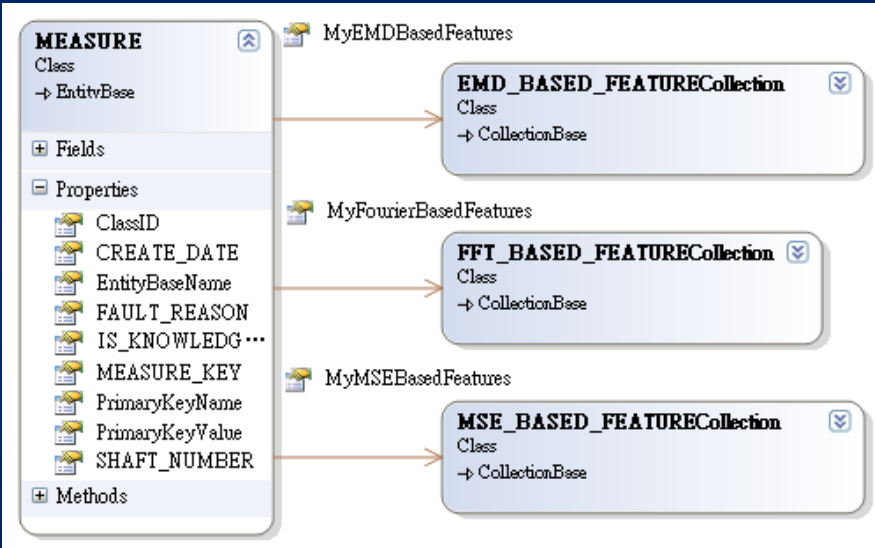
Model: 建立日期: 1753年 1月 1日 至 9998年12月31日

	主軸編號	製令	工作站	建立日期	建立者
1	B99057	JA990528	後軸承組裝	2010/6/23 下午 05:06	劉家豪
2	A402044	JA990528	後軸承組裝	2010/6/23 下午 06:16	劉家豪
3	A1005005	Q99169	零件驗證	2010/7/22 上午 09:40	劉家豪
4	B99061	Q99169	零件驗證	2010/7/22 上午 10:21	劉家豪
5	B99062	Q99170	溫升測試	2010/7/22 上午 10:28	劉家豪
6	B99072	Q99223	溫升測試	2010/8/9 下午 05:07	劉家豪
7	M99141	Q99237	產品檢驗表	2010/8/10 上午 09:44	劉家豪
8	M99142	Q99238	產品檢驗表	2010/8/10 上午 09:57	劉家豪
9	B99071	Q99222	產品檢驗表	2010/8/9 下午 04:52	劉家豪
10	M99143	Q99239	零件驗證	2010/8/10 上午 10:39	劉家豪
11	B99064	Q99172	產品檢驗表	2010/8/10 上午 10:52	劉家豪
12	B99065	Q99221	產品檢驗表	2010/8/10 上午 11:01	劉家豪
13	M99127	Q99231	產品檢驗表	2010/8/10 上午 11:41	劉家豪
14	M99129	Q99233	產品檢驗表	2010/8/10 上午 11:52	劉家豪
15	M99061	Q99169	零件驗證	2010/8/10 下午 01:20	劉家豪
16	B99066	Q99069	產品檢驗表	2010/8/11 上午 09:03	劉家豪
17	B99067	Q99070	產品檢驗表	2010/8/11 上午 09:16	劉家豪

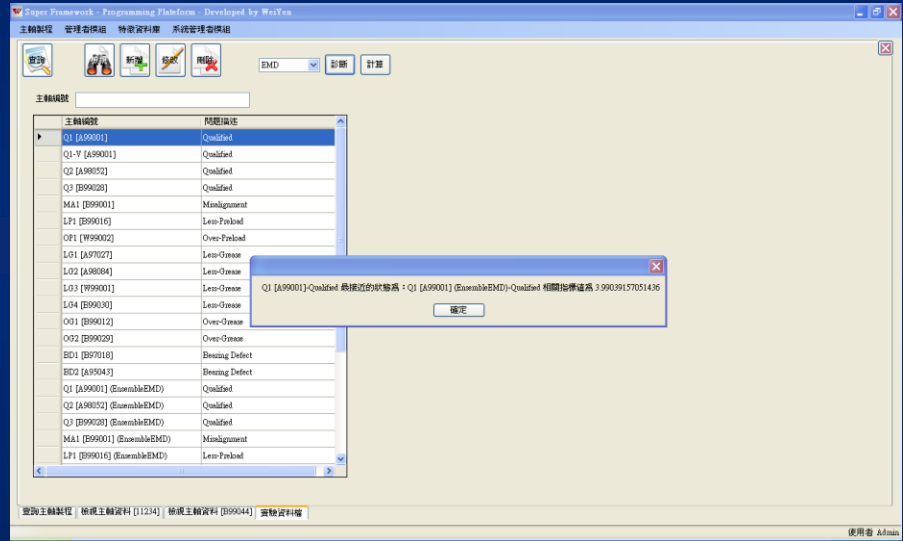
查詢主軸製程 使用者 Admin

損壞辨識系統

損壞辨識系統 Class Diagram



損壞辨識系統 使用者介面

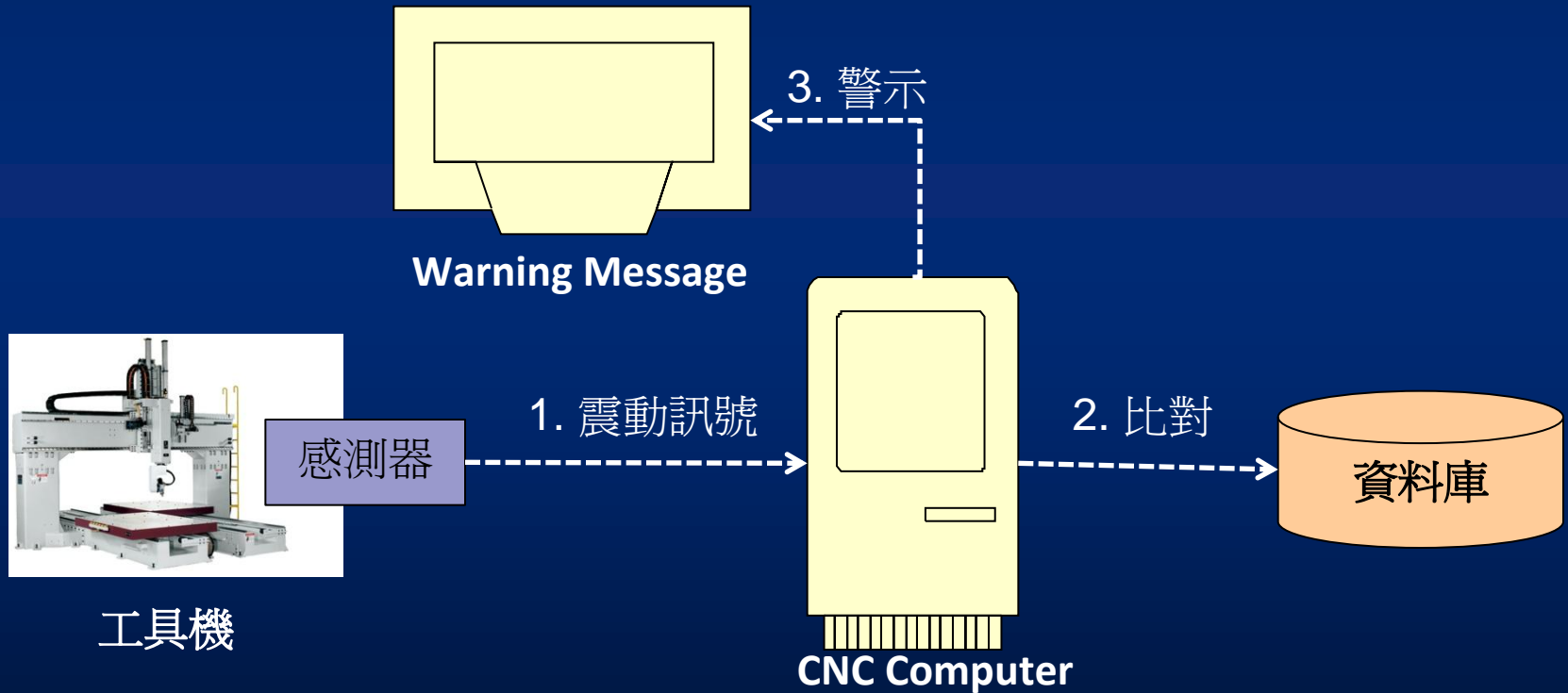


未來展望

未來展望

➤ 工具機線上監測裝置 (On-line Detection Device) :

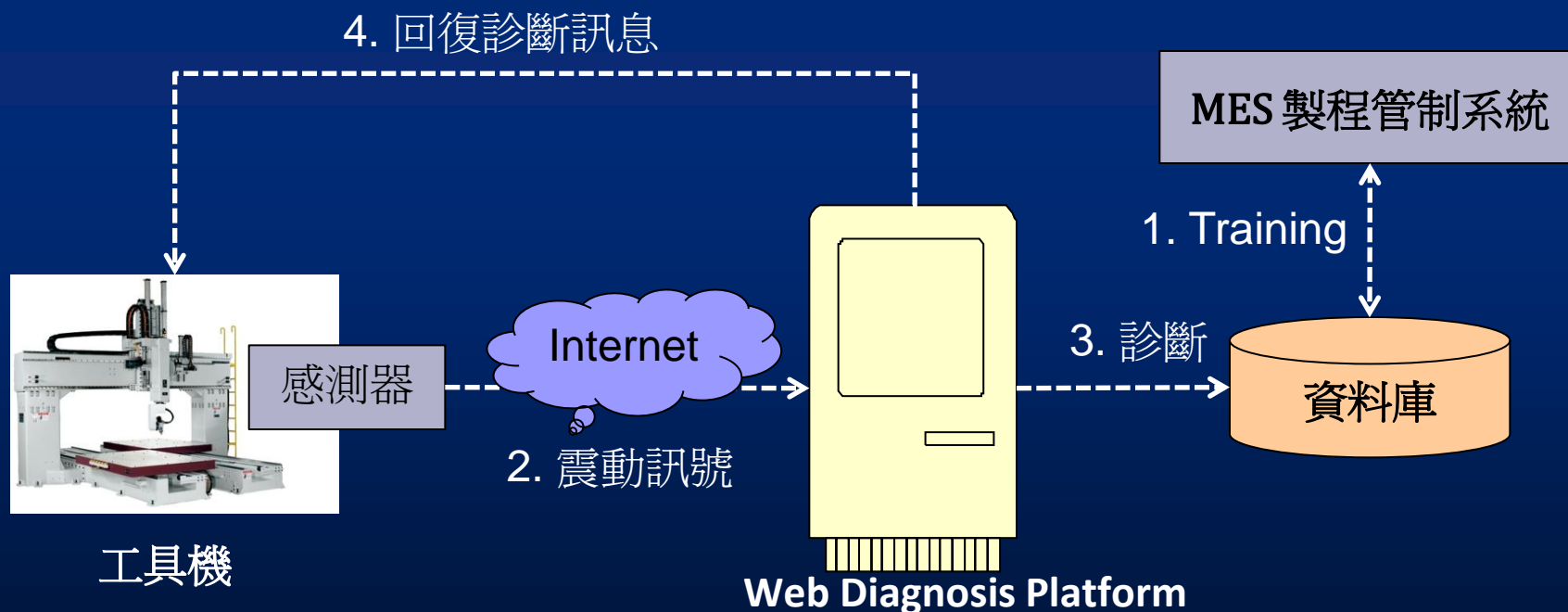
提供主軸廠商埋置入出廠主軸，隨主軸至客戶端，當客戶端主軸有瑕疵，則停止操作，避免過度損壞。



未來展望

➤ 線上診斷平台 (On-line Diagnosis Platform) :

提供國外客戶將震動訊號傳回至主軸廠的伺服器進行目前機台健康狀況診斷，目前的演算法對於軸承潤滑不足非常敏感，可以在客戶主軸潤滑油不足之前提醒應該加入或替換潤滑油，延長主軸壽命，或主軸已有偏心問題，請查報維修。



未來展望

➤ 製程管制系統後續延伸：

製程管制系統蒐集線上製程資訊之後，可以作後續六個標準差的統計分析，並且結合 Triz 方法回推當時製程問題，此為完整解決方案，並且藉由與損壞辨識系統整合，大量蒐集資料。

