

出國報告（出國類別：實習）

赴加拿大曼尼托巴省曼尼托巴大學機械
工程學系學習放射廢棄物處理相關技術

服務機關：行政院原子能委員會核能研究所
姓名職稱：程貴仁 薦任副研究員
派赴國家/地區：加拿大
出國期間：107/06/19~107/07/18
報告日期：2018/08/13

摘要

此次實習係為配合核研所目前執行的「爐體廢棄物除役技術開發及清理作業」研究計畫，赴加拿大曼尼托巴省曼尼托巴大學(University of Manitoba, Manitoba, Canada)機械工程學系學習放射廢棄物處理相關技術。

爐體廢棄物除役技術開發計畫的主要工作之一，在於開發高活度組件的水下切割設備。由於相關設備係在高輻射的環境下作業，如果作業期間發生失效，將會對作業團隊帶來極大的困擾及造成可能的工安事件與時程的延誤。有鑒於此，核研所相關工作團隊積極尋找可行的解決方案，避免相關切割設備在作業期間發生失效。一般業界避免設備失效的方法主要分成二種，第一種為設備監測與診斷，第二種則為可靠度分析與維護管理。經初步的調查發現，我國雖四面環海，但是在水下監測與可靠度分析的領域著墨甚少，所以需向國外研究單位學習相關技術，盡快建立起相關的技術能量。

加拿大地廣人稀，許多地方的能源與經濟收入來自於風力發電與油砂，如果相關設備發生預期的失效，將會對人民生活與經濟收入造成重大影響，所以，加拿大的產、官、學已投入相當資源研究如何避免設備非預期的失效發生。此外，相關設備多在露天的工作環境下作業，承受風雪的侵襲與影響。在雨季，相關設備所處的環境與核研所目前開發的水下切割設備類似，所以，相關應用的監測與可靠度分析技術應可應用到未來核研所開發的水下切割設備中，解決未來相關的需求。

加拿大曼尼托巴大學機械工程學系網羅從事於風機與油砂幫浦等相關遠端監控、失效診斷及可靠度分析等相關領域研究人員，在相關領域具有相當的理論與實務能力。此次實習在相關人員的指導下，學習到遠端監控、失效診斷及可靠度分析等相關領域的部分理論與經驗，並獲得下述心得，及提出如後的建議：

心得：

1. 遠端監控、失效診斷及可靠度分析相關技術能力的建立，皆是由長時間的不斷學習累積而成，難以一蹴可及。
2. 設備遠端監控、失效診斷及可靠度分析的基礎理論雖可應用到不同設備，但實務上，如何應用相關理論與技術將依設備需求或使用環境而有所不同。
3. 不同設備與不同的作業環境須建立不同的分析模型，所以，了解不同設備與不同作業環境間的差異，建立不同的分析模型，為相關技術成功應用的基

礎。

建議：

1. 建議以長期投資的態度來建立相關的能力，達到世界級的水準。
2. 建議延攬他國學者，以自費或我方提供經費方式，共同參與相關技術的建立，確保技術的完整性。
3. 建議多派員至國外學習未來所需的技術，減少自我摸索的時間，縮短相關的學習曲線，盡早建立我方自主能力。

目 次

| | |
|----------------------------|----|
| 摘 要 | i |
| 一、目 的 | 1 |
| 二、過 程 | 3 |
| 三、心 得 | 23 |
| 四、建 議 事 項 | 24 |
| 參 考 資 料 | 25 |
| 附錄一 Liang 博士的論著 | 26 |
| 附錄二 失效模式、效應與關鍵性分析表範例 | 32 |

一、目的

此次實習主要為配合行政院原子能委員會核能研究所(以下簡稱核研所或本所)執行「爐體廢棄物除役技術開發及清理作業」研究計畫，赴加拿大曼尼托巴大學機械工程學系實習，學習放射廢棄物處理相關技術。實習期間由 107 年 6 月 19 日起，至 107 年 7 月 18 日止，共計 30 日。

「爐體廢棄物除役技術開發及清理作業」研究計畫的工作項目包含開發反應器爐體切割技術，其中爐體高活度組件水下切割技術為該技術開發的重點。由於該技術相關的設備皆用於切割高活度組件，並作業於高輻射劑量的水下環境中，難以作近端監控，了解設備的實際作業的現況。如果，相關設備在切割作業時發生了失效，不但延誤切割時程的規劃，也將導致相關作業人員承受更多的輻射劑量，所以，要避免相關非預期失效的發生。

有鑑於此，本計畫規劃建立水下遠端監控、失效診斷與可靠度分析等能力，避免相關設備於切割作業中發生失效。由於國內目前缺乏相關的經驗與技術，故規劃此次實習，希藉由國外專家的經驗與協助，期獲如下的成效：

1. 習得遠端水下監測、失效診斷、可靠度分析相關理論，加速相關知識的建立。
2. 了解遠端水下監測、失效診斷、可靠度分析相關應用範圍與限制，有效地建立相關技術。

加拿大富有天然資源，該國政府已投入相當的資源在風力發電與油砂生產等技術開發。然而加拿大地廣人稀，許多風力發電設備與油砂開採作業皆位於人煙稀少的地區，其相關的輸配電線路與油砂或原油輸送管路所經的區域，不但動輒數百公里之遙且人煙罕至，如不發展相關遠端監控技術，將耗損大量人力與資源從事現地監控的工作，非該國相關產業所能負擔。所以，該國政府與產學等機構皆投入大量資源，發展遠端監控技術，解決該國風力發電與油砂產業所面臨的問題。此外，由於大量相關的設備、管路與線路皆位於人煙罕至的區域，所以如發生非預期的失效，即使緊急動員相關人力與資源至失效現場，往往也需數日之久，除造成經濟損失外，更可能對環境造成巨大的傷害。有鑑於此，加拿大產學機構也積極開發失效診斷與可靠度分析等技術，藉由此相關技術，事前預測失效的發生，調集相關人力與資源至失效可能發生的現場，執行相關的維護作業，避免失效的發生，增進相關設備的經濟利益與產值。

曼尼托巴大學為加拿大一著名學府，該機械工程學系網羅了從事遠端監控、失效診斷及可靠度分析等相關領域研究人員，並建立起相當的技術能量。Larry Liang 博士近期為加拿大曼尼托巴大學機械工程學系所網羅，從事於遠端監控、失效診斷及可靠度分析等研究。Liang 博士除擔任曼尼托巴大學機械工程學系助理教授外，另為 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)、Canadian Machinery Vibration Association (CMVA) 與 Association of Professional Engineers and Geoscientists of Alberta (APEGA) 的會員，在遠端監控、失效診斷及可靠度分析等領域有數十篇的論著發表，名聲顯著，相關論著如附錄一所示。希藉由此次實習，在 Liang 博士指導下，快速習得遠端水下監測、失效診斷、可靠度分析相關理論與知識，建立相關能量，提升我國在爐體高活度組件水下切割技術的能力。

二、過程

(一) 行前準備

曼尼托巴大學成立於1877年，為加拿大著名的大學之一，圖2.1.1所示為該校的部分校園 [1]。依據 2016 年至 2017 年的統計資料顯示（取自網頁：<http://umanitoba.ca/about/factandfigures/#by-the-numbers>），該大學的學生人數接近3萬人，而教職員的人數則為9千多人，致力於先進技術開發研究與在地化等工作。

曼尼托巴大學機械工程學系隸屬於工學院，工學院大樓如圖2.1.2所示，在曼尼托巴大學的制度上，學院負責資源分配及未來的整體規劃，而系所則負責執行學院的規劃。目前該工學院對機械工程學系的規劃方向為：強化對產業間的連繫和致力於應用力學與設計、製造與量產、材料研究與工程及熱流與能源系統等研究，過往的研發成果與相關貢獻如圖2.1.3所示。此次實習主要是向應用力學與設計領域的Liang博士學習遠端水下監測、失效診斷、可靠度分析相關理論與知識。



圖 2.1.1 曼尼托巴大學校園

(二)行程

| 日期 | 地點 | 內容 |
|-------------------|---------------------------|----------------------------------|
| 06月19~20日 | 桃園→溫哥華機場→溫尼伯機場 →溫尼伯市 | 去程 |
| 06月21日~ 07月15日 | 溫尼伯市 | 赴加拿大曼尼托巴大學機械工程學系實習，學習放射廢棄物處理相關技術 |
| 07月16~18日 | 溫尼伯市→溫尼伯機場→溫哥華 機場→桃園機場 | 回程 |

此次實習共計30日，由107年06月19日至07月18日。研習地點為加拿大曼尼托巴省曼尼托巴大學機械工程學系，研習遠端監控、失效診斷及可靠度分析等相關理論與應用。藉由此次實習了解遠端水下監測、失效診斷、可靠度分析相關理論，獲取相關知識及應用範圍與限制，有助我國在爐體高活度組件水下切割技術能力的發展。此次實習的航班規劃如圖2.2.1所示。

| 日期 | 時間 航班 | 其他資訊 |
|---------------------|--|--|
| 06月19日(二) | 中華航空(CI32) 2345出發:台北桃園(TPE)台灣桃園國際機場 1915抵達:溫哥華(YVR)溫哥華國際機場 | 經濟艙 /直飛 機位OK /第二航站 10小時30分鐘 /主航站大廈/餐點 空中巴士 A359 |
| 06月20日(三) | 西捷航空(WS448) 0915出發:溫哥華(YVR)溫哥華國際機場 1357抵達:溫尼伯(YWG)溫尼伯詹姆斯阿莫斯壯理查 德森國際機場 | 經濟艙 /直飛 機位OK /主航站大廈 2小時42分鐘 // 波音 737-800 |
| 07月16日(一) | 西捷航空(WS451) 1430出發:溫尼伯(YWG)溫尼伯詹姆斯阿莫斯壯理查 德森國際機場 1531抵達:溫哥華(YVR)溫哥華國際機場 | 經濟艙 /直飛 機位OK / 3小時01分鐘 /主航站大廈/ 波音 737-700 |
| 07月17日(二) 07月18日 | 中華航空(CI31) 0220出發:溫哥華(YVR)溫哥華國際機場 0520抵達:台北桃園(TPE)台灣桃園國際機場 | 經濟艙 /直飛 機位OK /主航站大廈 12小時00分鐘 /第二航站/餐點 空中巴士 A359 |

圖 2.2.1 航班規劃

(三) 實習內容

Liang 博士在此次的實習上提供了很多的協助，除了利用本身計劃的資源提供了實習所需的電腦資源，另極力該學院爭取等同職員待遇，准許使用所有圖書資源及教職員專用的休憩室，圖 2.3.1 為該校職員用的門禁管制卡。



圖 2.3.1 門禁管制卡

此次實習 Liang 博士除解釋說明水下監測、失效診斷、可靠度分析相關理論外，另提供相關資料文獻介紹其相關的應用，相關學習心得如下：

1. 遠端監測與失效診斷

1. 監測技術

Liang 博士在設備遠端監測技術部分，主要是利用監測設備的振動，了解設備的現況，判斷是否將有失效發生，以預先準備，確保設備不會有非預期性的失效發生。由於此技術是利用加速規或其它方式檢測設備的振動行為，故可應用在水下及具有放射性的環境使用，符合本所在未來相關的爐體高活度組件水下切割技術發展之需求，該監測技術的基本理論如後所述：

機械設備藉由馬達、引擎或其它的動力輸入方式來產生運動，而多數的動力源是以轉動的方式來帶動設備，在未來我國高活度組件水下切割用設備中，主要的動力源皆是以轉動方式來驅動設備運作，圖 2.3.2 為本所目前開發的水下切割用圓盤鋸設備示意圖。

轉動設備可能因為製作或組立的誤差所造成的不平衡或不對位而產生振動，然而，製作或組立誤差是無法完全消除的，所以，所有的轉動設備皆會有振動產生，只是程度與特性有所不同。為更了解設備振動起因與特性，以下將概述振動的原理：

一般而言，轉動設備所產生的一維振動模型可簡化如圖 2.3.3 所示[2]。其中 x 表示位移量，為時間 t 的函數； m 表示設備的等效質量； c 表示影響設備振動的等效阻尼； k 表示影響設備振動的等效彈性係數； $F_0 \sin \omega t$ 表示設備因旋轉產生的簡諧性外力。相關的振動運動方程式可表示如(1)所示：

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (1)$$

當設備運轉一段時間後，(1)的解可表示為： $x = X \sin(\omega t - \phi)$ ，其中 $X = \frac{F_0}{\sqrt{(k-m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}$ ； $\phi = \tan^{-1}(\frac{c\omega}{k-m\omega^2})$ 。當設備因轉動產生的外力頻率 $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \omega_n$ 時，(ω_n 為系統的自然共振頻率)， X 會出現最大值。這是為何設備在設計上要避免設備的自然共振頻率與設備在使用時因轉動而產生的輸入力頻率接近之原因。

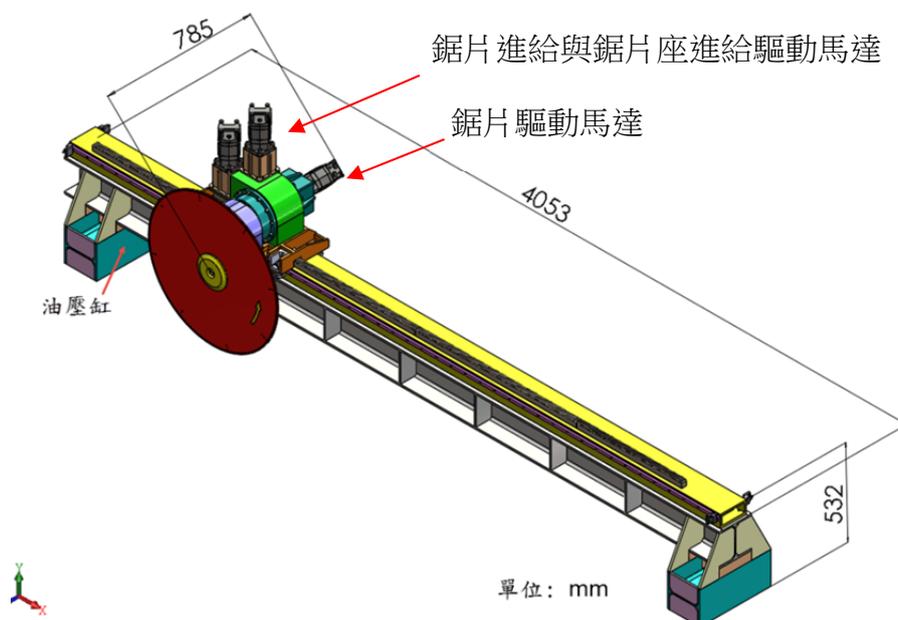


圖 2.3.2 水下切割用圓盤鋸示意圖

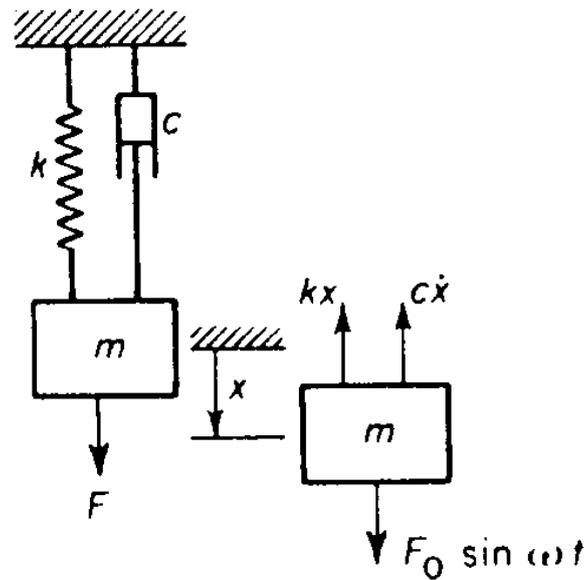


圖 2.3.3 設備一維振動模型自由體圖

當原來一維的振動模型擴展到多為空間後，設備的振動的運動方程式可表示為(2)。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (2)$$

其中 M 為 $n \times n$ 的質量矩陣； C 為 $n \times n$ 的阻尼矩陣； K 為 $n \times n$ 的剛性矩陣； F 為 $n \times 1$ 的外力向量； x 為 $n \times 1$ 的位移向量； n 為此系統的振動維度。

當系統擴充到 n 個維度，設備在振動上就可能有 n 個不同的共振頻率，具有 n 個不同的共振模態。

由上可知，當設備的運轉條件不變的情況下，設備的振動頻譜應維持不變。換句話說，當設備有過度磨耗、鬆脫或結構發生損傷時，設備運轉時產生的頻譜將會與正常情況不同，所以，可藉由監測設備運轉時的頻譜狀況，判斷設備是否已有損傷發生。

2. 失效診斷

當設備在正常、穩定運轉條件下情況下，設備產生的頻譜，不論在時域或頻域皆會有穩定的訊號產生。然而，當設備發生過度磨耗、鬆脫或結構發生損傷時，就會有其它的振動訊號產生。藉由捕獲此些非正常狀態的訊號，不但可以判定設備零件有損壞發生，更能進一步地找出哪一個零件失效。

以某一規格的行星齒輪為例[3]，當所有構成零件皆正常時，其時域振動訊號應如圖 2.3.4 所示；頻域的振動訊號應如圖 2.3.5 所示。當 sun gear 某一齒發生某一種尺

度的損傷時，其時域振動訊號將如圖 2.3.6 所示；頻域的振動訊號將如圖 2.3.7 所示。

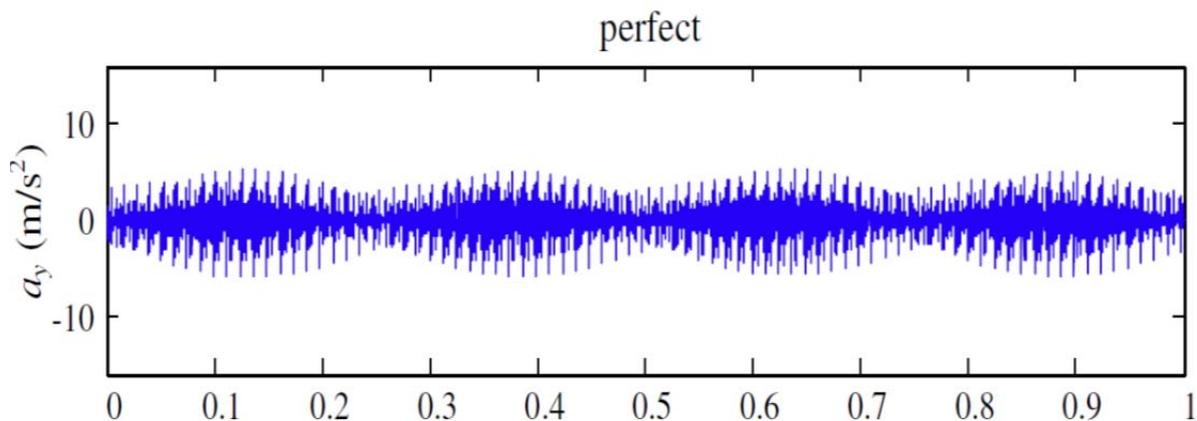


圖 2.3.4 正常情況下時域頻譜

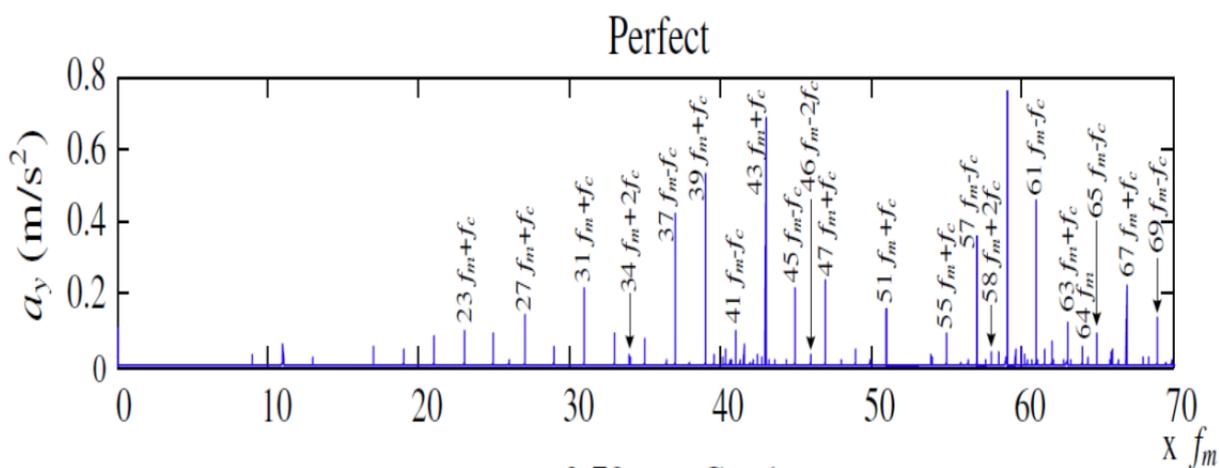


圖 2.3.5 正常情況下頻域頻譜

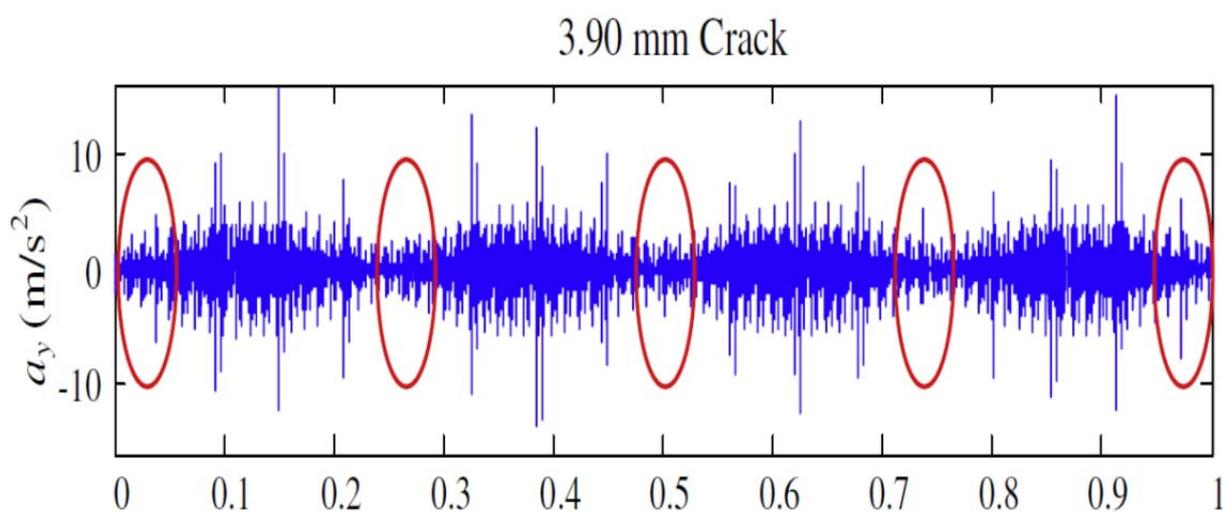


圖 2.3.6 損壞情況下時域頻譜

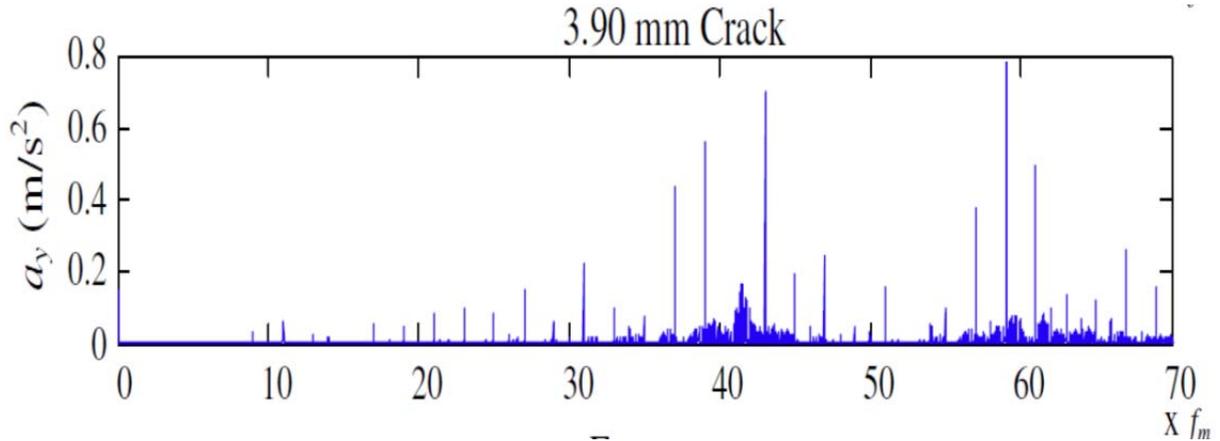


圖 2.3.7 損壞情況下頻域頻譜

以設備運作時的頻譜來判斷設備是否有損壞發生，是一種非常直接而有效的方式，然而，要獲取相關的頻譜資訊卻非一件容易的事。以行星齒輪為例[4]，震動感知器(加速規)監測的位置受到震動傳遞路徑的影響，不同的監測位置所得到的所需訊號差異甚大。此外，所測得的訊號混雜許多的雜訊及訊號間的干涉結果，所以，要過濾出所需的訊號，需要複雜的演算法，絕非一件容易的事。

2. 可靠度分析

1. 可靠度基礎

可靠度概述：

可靠度定義為：可靠度是指一產品(系統或設備)於期望的壽命時間內與所規定的使用環境條件下，執行其預期功能而不產生故障、失效的機率。可靠度著重於產品可以衡量而予以計量的數值，諸如機率值或壽命時間。簡單來說，可靠度是衡量產品經使用一段時間後仍維持某一品質水準的指標。在結構件方面，可靠度定義為該結構件強度大於所承受應力的機率。

要完整地確定設備的可靠度，應先確定以下四個關鍵因素，即設備應達成的功能，設備的期望壽命時間，設備的使用環境，以及設備不故障或失效的機率。一般而言，設備的可靠度隨使用時間會有如浴缸般的變化，如圖 2.3.8 所示。實務上，使用可靠度方法對產品生命週期中所遭遇的環境與應力情況做相關預估，從結構設計開始到原物料選擇，在有限的預算下，達成適當的可靠度。此外，可靠度技術從設備失效方面加以認識設備並做預防工作，使設備在使用期之失效率降低，並分析設備中關鍵性元件的壽命，以規劃定期性的維護工作。運用可靠度技術可使設備使用期延

長，並預估設備磨耗之程度而予以維修或淘汰，以增加設備的可用性。

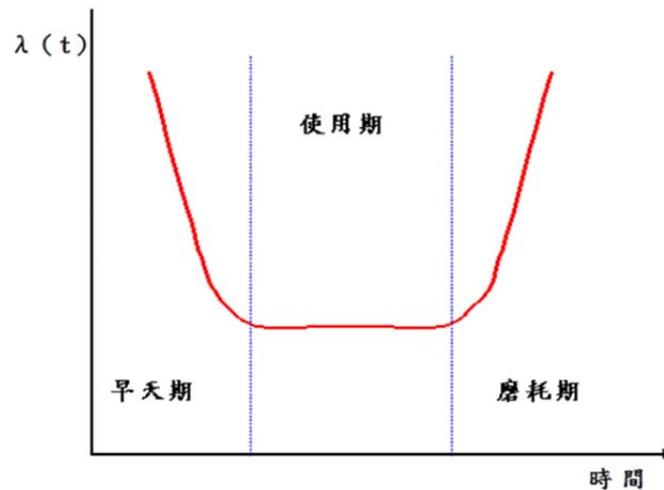


圖 2.3.8 可靠度浴缸曲線示意圖

(I)零件可靠度

當零件可靠度用指數分布來描述時，如其平均失效間隔時間(Mean Time Between Failure, MTBF)是 $\frac{1}{\lambda}$ 小時，則該零件在時間 t 的可靠度可表示為 $R(t) = e^{-\lambda t}$ 。所以，如所要的可靠度需大於 p 時，則其使用或檢修時間不可超過 $-\frac{\ln(p)}{\lambda}$ 小時。

設備往往是由許多零件組合而成，而每一個零件皆有其設計所賦予的功能與相關的可靠度。因此，現今之可靠度預估多由零件出發，延伸擴展至設備整體之可靠度預估。

(II)設備可靠度

設備是由許多零件所構成，不易直接推估出其可靠度，所以實務上常利用可靠度方塊圖來輔助及簡化其可靠度的推估。從可靠度方塊圖中，各構成零件間的相互關係與其對設備可靠度的影響可以由圖面直接獲得。各構成零件間的連接關係一般可分為串聯、並聯與橋式等形式，以下將先說明功能方塊圖與可靠度方塊圖，之後再分別概述各種連接形式對設備可靠度的影響與推估。

(III)功能方塊圖與可靠度方塊圖

設備開發過程中，一般先規劃如何達成設備的設計規格要求，然後才評估在目前可行的設計規劃中，其設備可靠度為何。所以，在一般設備的設計實務上，設備功能方塊圖往往出現在可靠度功能方塊圖之前。

功能方塊圖是以圖形方式來描述設備中各構成零件的功能、作用與相互間介面關係。

在繪製功能方塊圖時所著重的是設備設計功能，以及為達成該設計功能其構成零件所須的功能與相互間的介面連接。一般而言，功能方塊圖左側為設備的輸入，右側為設備的預定設計輸出，而輸入與輸出之間則由各構成零件與其相互介面連接線所構成，如圖 2.3.9 所示。



圖 2.3.9 功能方塊圖

可靠度方塊圖所著重的是設備各構成零件可靠度與相互間組合對設備可靠度的影響，可依循功能方塊圖來繪製，但所著重的重點不同。在功能方塊圖中，各零件間的介面連接所在意的是：能否達成設計規格要求；而在可靠度方塊圖中，各零件間的連接所在意的是：能否會使設備的可靠度滿足規格要求，如圖 2.3.10 所示。

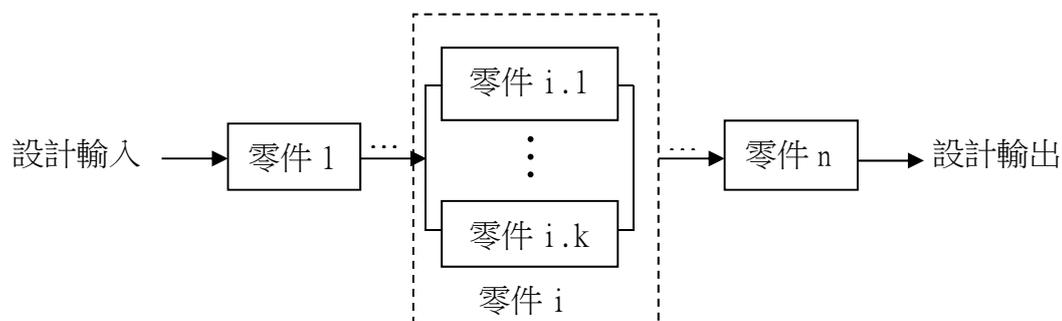


圖 2.3.10 可靠度方塊圖

(IV)設備整體可靠度模式

設備可靠度是由構成零件相互連接所形成，而可靠度方塊圖可協助了解構成零件可靠度與設備可靠度間的關係，進而評估出設備可靠度。藉由可靠度方塊圖可發現設備構成零件的連接可概分為下述三種：串聯、並聯與橋式。構成零件不同的連接方式對設備可靠度將造成不同的影響，以下將分別概述不同零件連接方式對設備可靠度的影響。

串聯：

串聯顧名思義就是設備構成零件一個串一個的方式來連接，如圖 2.3.11 所示。

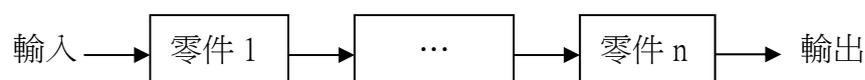


圖 2.3.11 串聯零件示意圖

在串聯的結構中，設備的輸入要變成輸出，須經過零件 1 到零件 n，其中任何零件的失效將導致設備的失效。所以，設備的作用正常取決於所有構成零件的作用正常。如設備是由 n 個獨立零件「串聯」構成，則該設備可靠度可表示如(3)：

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (3)$$

其中 R_s 為設備的可靠度； R_i 為組成零件i的可靠度。

由於設備是由 n 個零件「串聯」組合而成，因此只要其中任何一個零件失效即會造成設備的失效。因此設備可靠度為各構成零件可靠度的乘積。

當「時間」為影響可靠度的重要因素時，設備整體可靠度 $R_s(t)$ 可表示為(4)：

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (4)$$

其中 $R_s(t)$ 為設備在時間t前不產生失效的機率； $R_i(t)$ 為第i個零件在時間t前不產生失效的機率。

若當每一個零件可靠度 $R_i(t)$ 皆為常數 λ_i 的指數分佈，則設備可靠度如(5)所示：

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-(\sum_{i=1}^n \lambda_i) t} \quad (5)$$

因此，設備整體的失效率可表示如(6)所示：

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (6)$$

其中 λ_s 為設備失效率； λ_i 為零件i的失效率；n為設備中串聯零件的數目。

當設備中每一個串聯零件的可靠度 $R_i(t)$ 遵循失效率為常數 λ_i 的指數分佈時，系統總失效率等於系統中每零件失效率的總和。

當失效率為常數且滿足指數分佈的假設時，設備的 MTBF 如(7)所示：

$$MTBF = \theta_s = \frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (7)$$

雖然「指數分佈」在可靠度應用上佔有重要的角色且適用於許多的零件與設備，如果實際觀察的失效數據違反這個假設，可先找出適合的失效分佈後，再計算與預估系統的可靠度。

並聯：

並聯顧名思義就是構成零件同時承受同一來源的輸入，如圖 2.3.12 所示：

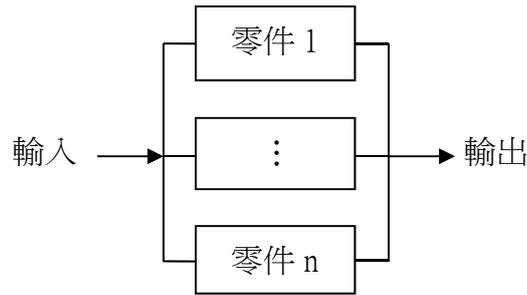


圖 2.3.12 並聯零件示意圖

在並聯的結構中，如果經設備的輸入要變成輸出，則可經過零件 1 到零件 n，假設任一零件正常即可確保設備正常作用，所以設備功能的失效發生於所有構成零件的失效。所以，設備的作用正常取決於任一構成零件的作用正常。在並聯的連接條件下，設備可靠度可表示如(8)所示。

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (8)$$

其中 R_s 為設備的可靠度； R_i 為組成零件i的可靠度。

橋式：

橋式的連接方式，同時具有串聯與並聯的性質，如圖 2.3.13 所示。

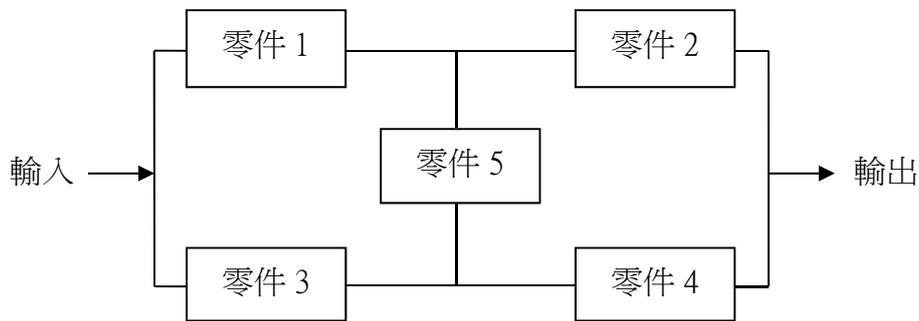


圖 2.3.13 零件橋式連接示意圖

在處理橋式的連接上一般使用分解法，亦即將圖 2.3.13 所示的連接結構分成當零件 5 正常時與零件 5 失效時之兩種情況分別討論，相關情況如圖 2.3.14 與圖 2.3.15 所示：

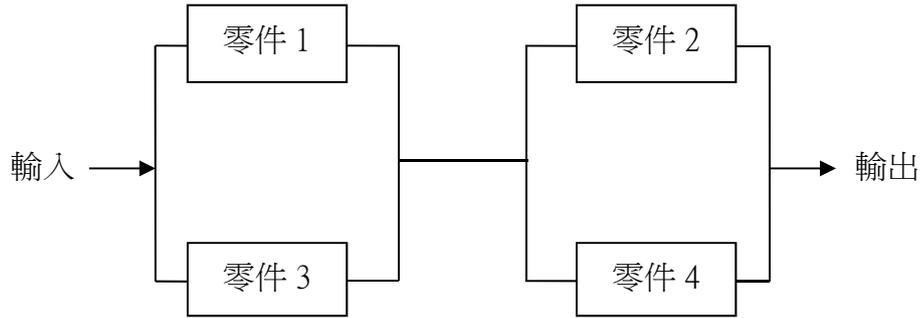


圖 2.3.14 零件 5 正常時等效示意圖

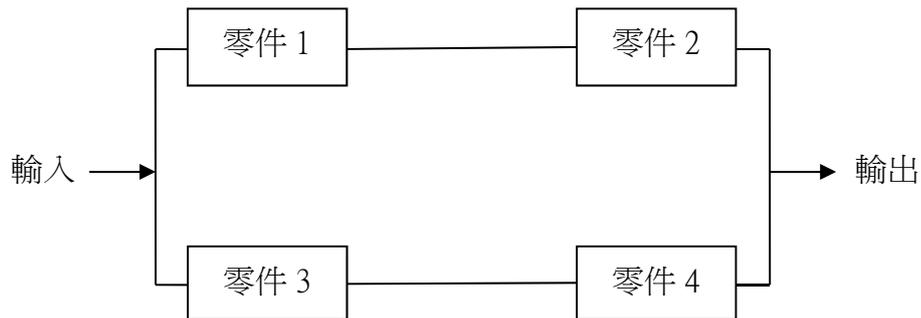


圖 2.3.15 零件 5 失效時等效示意圖

由圖 2.3.14 可知，當零件 5 正常時，該橋式連接等效於並聯的零件 1 與零件 3 及並聯的零件 2 與零件 4 間的串聯連接。由圖 2.3.15 可知，當零件 5 失效時，該橋式連接等效於串聯的零件 1 與零件 2 及串聯的零件 3 與零件 4 間的並聯連接。所以該橋式連接的設備可靠度如(9)所示：

$$R_s = R_5 \cdot [1 - (1 - R_1) \cdot (1 - R_3)] \cdot [1 - (1 - R_2) \cdot (1 - R_4)] + (1 - R_5) \cdot [1 - (1 - R_1 \cdot R_2) \cdot (1 - R_3 \cdot R_4)] \quad (9)$$

其中 λ_5 為設備失效率； $\lambda_1 \dots \lambda_5$ 為零件1 ... 5的失效率。

由(9)可發現：在橋式連接的情況下，設備的可靠度是由零件 5 正常情況加上零件 5 失效情況下的可靠度之和。

2. 失效分析

失效分析之目的在於找出影響設備可靠度最關鍵的因子或零件，另藉由改善這些最關鍵的因子或零件來經濟與有效地提昇設備可靠度。一般常用的失效分析技術為失效模式、效應與關鍵性分析(Failure Mode Effects and Criticality Analysis, FMECA)及失效樹分析(Failure Tree Analysis, FTA)等技術。相關技術將概述如下。

(I) FMECA

FMECA 是分析產品或設備設計(含製造)上可能的失效行為，並評估此失效行為對產品所造成之結果與效應，另依據其可能發生之機率及嚴重性加以分級的一種實用技術，可獲得量化之可能失效行為關鍵程度的資訊。在設備的設計實務上，FMECA 主要用於定量化地描述影響設備可靠度的關鍵性因子或零件，作為評估可靠度改善措施的優先順序的依據。以下將說明如何使用 FMECA。

使用 FMECA 的程序如下所述：

- (a) 列出設備的可靠度方塊圖，並對圖形中每一方塊元素（即零件）賦予一代碼。
- (b) 列出圖形中每一方塊元素的名稱。
- (c) 描述每一方塊元素的功能。
- (d) 列表表示無法符合設計規格的可能失效行為，並對每一個可能失效行為的可能原因加以說明。對於每一失效行為及原因，在各方塊元素識別碼後依序編號。
- (e) 詳細說明此失效行為發生後對設備不同層級所產生的效應。
- (f) 考量失效行為發生後對產品與使用環境可能造成的影響嚴重性。
- (g) 列出此失效行為可能對系統造成影響的機率。
- (h) 分析、預估各失效行為的發生比率 α 值。
- (i) 分析、預估各失效行為對系統造成損傷機率 β 值。
- (j) 分析、預估該失效行為所屬的方塊元素之失效率 λ 。
- (k) 分析、預估該失效行為所屬的方塊元素之使用時間 t 。
- (l) 計算該失效行為關鍵性值($C_m = \alpha \cdot \beta \cdot \lambda \cdot t$)，而方塊元素的關鍵性值則為所屬所有失效行為之關鍵性值之總和。關鍵性值越高則代表該失效行為或該方塊元素對設備可靠度的影響越大。

此外，嚴重性等級分類一般定義如下：

- (i) I 級失效(Catastrophic)：凡導致整個設備損失或造成使用者致命性傷害之失效情況屬之。
- (ii) II 級失效(Critical)：凡使設備嚴重受損或造成使用者嚴重傷害之失效情況屬之。
- (iii) III 級失效(Marginal)：凡使要設備輕微受損、無法完全達成設計要求或造成使用者較小傷害之失效情況屬之。

(iv)IV級失效(Minor)：凡不會使設備受損且不影響設計要求者，但會導致非預期性維護或修理之失效情況屬之。

(II)失效樹分析

失效樹分析為一由上而下的分析技術，在假設失效情況下逐一的向下(設備構成的零組件)分析，找出所有可能的失效組合。在作法上以圖形的方式，將假設的失效事件置於圖之上方，將可能造成的原因置於下方。然後藉由上述的方法，將可能造成的原因再進一步分解找出造成該原因的原因，在分析的過程中，前一階段的原因就是次一階段的失效事件。持續此一步驟，直到所有的原因在經濟上不可分析為止。此一圖形為失效事件在上，造成原因在下的樹狀邏輯關係圖。

失效樹在建構上是利用連接線、事件與邏輯符號來建構出某失效事件發生情況下的所有原因組合之圖形，再藉由該圖形來找出該失效發生的可能原因與機率。圖 2.3.16 為一失效樹的示意圖，之後，再說明相關使用的圖示。

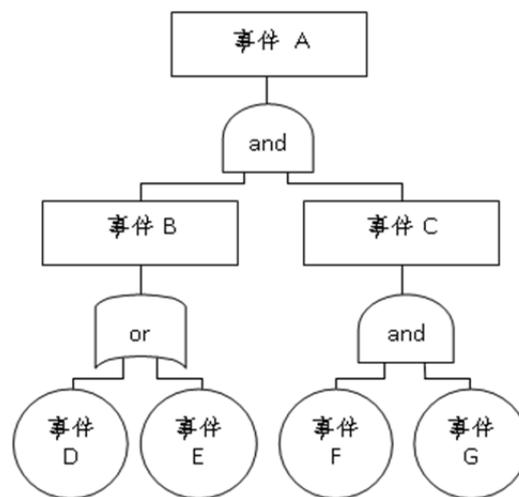


圖 2.3.16 失效樹示意圖

失效樹分析圖形中，所關心的是置於圖形最上方的頂端事件，所要追尋是在圖形最下方的經濟上最根本之原因，又可稱之為基本事件。在失效樹分析圖形中，有用到兩類的符號，其分別為邏輯符號（又可稱為閘）與事件符號。邏輯符號所表示為輸入原因對輸出結果產生的影響邏輯關係，如表 2.3.1 所示；事件符號表示所屬事件的種類，如表 2.3.2 所示。

表 2.3.1 常用邏輯符號

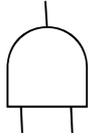
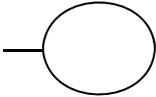
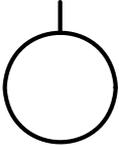
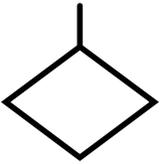
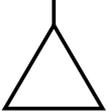
| | |
|---|---|
| AND 閘 所有輸入事件皆成立時，才有輸出。於 機率上，屬於交集運算子。 |  |
| OR 閘 輸入事件至少有一項成立時，即有輸 出。於機率上，屬於聯集運算子。 |  |
| 限制閘 當條件成立時，此時閘或輸入才會有輸 出產生。 |  |

表 2.3.2 常用事件符號

| | |
|---|--------------------------------------|
|  | 長方形： 通過邏輯閘，由若干輸入所產生的事件。 |
|  | 圓圈： 不是由其他輸入產生而得的事件，為一基本事 件。 |
|  | 菱形： 在經濟上不需或不用展開的事件，於可分類為 基本事件。 |
|  | 三角形： 由外部的失效樹移入的轉移符號。 |
|  | 倒三角形： 移出至其他失效樹的符號。 |

失效樹的建構一般可遵循下述規則：

- (i) 由已界定清楚的失效開始。
- (ii) 分析失效發生的原因，直至找到在經濟上最基本事件為止。

失效樹分析之目的在於找出造成頂端事件發生的基本事件組合，這樣的基本事件組

合稱之為：切割組(Cut Set)；最小切割組(Minimum cut set)則為：最小基本事件數目的切割組。當切割組中的所有事件發生時，產品系統將會有失效發生，所以失效樹分析的重要工作項目之一就是要找出最小切割組。設備的可靠度機率可藉由最小切割組來推估，防止最小切割組中所有事件的同時發生就是避免設備失效發生。在失效樹中可藉由邏輯閘的組合來找出最小切割組，由於邏輯閘在機率關係上分別代表輸入事件同時發生(and)與輸入事件任何組合發生(or)的狀況，所以當基本事件發生機率為已知，則頂端事件的發生機率與關鍵性事件可以藉由失效樹分析所建立之邏輯關係圖來評估

3. 應用

以圖 2.3.2 所示的水下切割用圓盤鋸為例(相關失效與其相關資料皆為假想數據以便說明使用)，以下將說明如何應用上述方法。

(I) 遠端監測與失效診斷

應用流程如圖 2.3.17 所示：

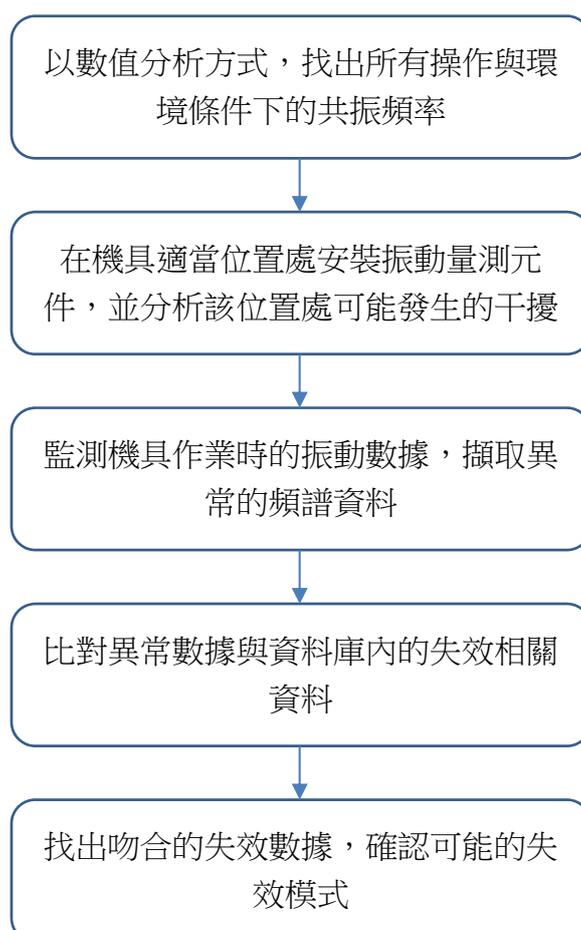


圖 2.3.17 遠端監測與失效診斷應用流程

(II)失效分析

依據圖 2.3.2 所示，圓盤鋸機主要由鋸片進給、鋸片座進給與鋸片驅動馬達及其它結構件所構成。一般而言，結構件失效機率遠低於運動件失效機率，為便於說明，以下僅使用鋸片進給、鋸片座進給與鋸片驅動馬達來說明如何在圓盤鋸機上應用可靠度分析技術。

對於多數的馬達而言，製造商皆會有相關馬達可靠度數據，如 MTBF。因為在設計上，鋸片進給、鋸片座進給與鋸片驅動馬達任一發生失效，皆會導致圓盤鋸機的失效，所以，圓盤鋸機為鋸片進給、鋸片座進給與鋸片驅動馬達串聯所構成的設備，如圖 2.3.18 所示。

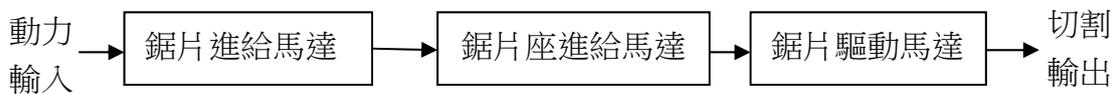


圖 2.3.18 圓盤鋸機可靠度方塊圖

假設，每個馬達的失效率皆為 λ ，則圓盤鋸機的失效率則為 3λ 、MTBF 則為 $\frac{1}{3\lambda}$ 。

由於圓盤鋸機為鋸片進給、鋸片座進給與鋸片驅動馬達串聯所構成，所以，圓盤鋸機的失效樹可表示如圖 2.3.19 所示。

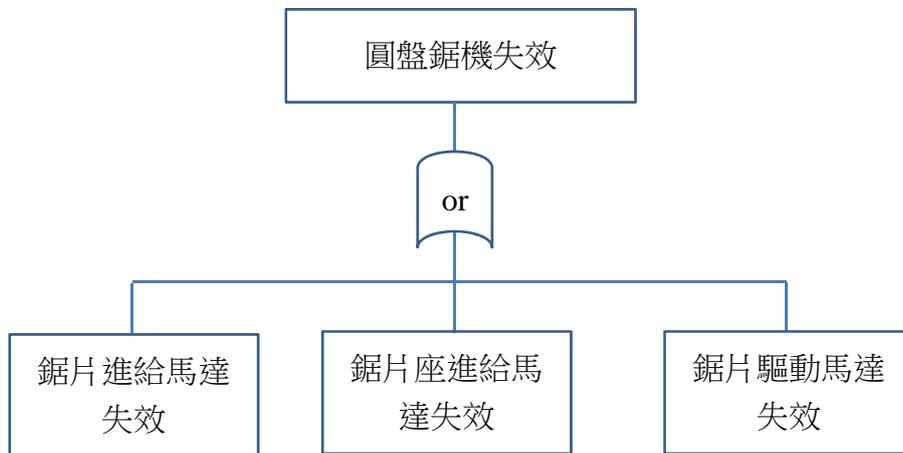


圖 2.3.19 圓盤鋸機失效樹示意圖

而圓盤鋸機相關的 FMECA 則如表 2.3.3 所示。藉由上述的分析，可清楚了解圓盤鋸機的可能失效行為、效應與頻率，作為相關維護保養規劃的依據。

表 2.3.3 圓盤鋸機 FMECA 表

計畫名稱：可靠度計畫

參考圖號：+++++++

系統名稱：圓盤鋸機

次系統名稱：*****

模組：-

零組件：-

頁數：1/1

| 單元／編號 | 功能規格 | 失效模式 | 失效原因 | 嚴重等級 | 失效率來源 | 失效率 λ | 失效效應損失機率 β | 失效模式發生機率 α | 操作時間 t | 失效模式關鍵性值 C_m | 項目關鍵性值 C_r | 備註 |
|---------|-------|------|-------------|------|-------|---------------|------------------|-------------------|--------|----------------|--------------|----|
| 鋸片進給馬達 | 鋸片進給 | 卡死 | 異物入侵 | II | 廠商資料 | 0.0005 | 1.0 | 0.2 | 5000 | 0.5 | Cr=0.7 | |
| | | 輸出不足 | 內部電阻或摩擦阻力變大 | III | 廠商資料 | 0.0005 | 0.1 | 0.8 | 5000 | 0.2 | | |
| 鋸片座進給馬達 | 鋸片座進給 | 卡死 | 異物入侵 | II | 廠商資料 | 0.0005 | 1.0 | 0.3 | 5000 | 0.75 | Cr=1.1 | |
| | | 滑步 | 內部電阻或摩擦阻力變大 | III | 廠商資料 | 0.0005 | 0.2 | 0.7 | 5000 | 0.35 | | |
| 鋸片驅動馬達 | 鋸片驅動 | 卡死 | 線圈燒毀或轉軸腐蝕咬合 | II | 廠商資料 | 0.0001 | 1.0 | 0.2 | 5000 | 0.1 | Cr=0.22 | |
| | | 輸出不足 | 內部電阻或摩擦阻力變大 | III | 廠商資料 | 0.0001 | 0.3 | 0.8 | 5000 | 0.12 | | |

審核者：xxx 分析者：xxx 日期：xx/xx/xx

4. 應用

使用可靠度分析技術，可於設備使用前，了解設備的可能失效行為、效應與頻率，除可作為設備維護保養規劃的依據，另可作為安全防護與緊急應變的參考。使用遠端監測與失效診斷技術，可於設備使用或運轉期間，評估設備的現況是否仍符合設計要求，及預測可能的失效發生，確保設備的使用安全性，及執行維護作業的參考。在未來高活度水下切割設備如使用相關技術，將可有效降低非預期性的失效發生，確保相關高活度廢棄物水下切割作業的安全性，有助於相關廢棄物處理的有效性。

三、心得

至加拿大曼尼托巴大學機械工程學系研習期間，研究振動監測、失效診斷、可靠度分析等相關理論與技術，研習心得概述如下：

(一) 加拿大政府與學術機構對於基本理論的研究與技術的建立，皆以長期投資的態度來培育。故參與計畫的研究人員得以專注於該理論或技術的建立，紮下穩固的理論或技術基礎。加拿大學術機構投資於研究遠端監控、失效診斷及可靠度分析等相關技術已超過 8 年的時間，已建立雄厚的理論基礎與實踐方法，後進者難以於短時間內，望其項背。

(二) 加拿大學術機構積極延攬與邀請來自各國學者，共同研究或分享相關的理論與技術，確保研究或開發的理論或技術得以考慮周詳，沒有偏頗。依據經驗顯示，設備遠端監控、失效診斷及可靠度分析的基礎理論雖可應用到不同設備，但實務上，如何應用相關理論與技術將依設備需求或使用環境而有所不同。

(三) 加拿大學術機構投入遠端監控、失效診斷及可靠度分析等領域已有相當的時間，對於該國業界不同設備與不同的使用需求也建立了不同的分析模型與實踐方式，成功地解決業界所面臨的問題，提升該國產業的競爭力。所以，長期的技術投資，有助於技術產業化，有效地將建立的技術成功地解決產業面臨的問題。

四、建議事項

- (一) 基礎理論與技術的建立非一蹴可及，需要長時間的人力與資源的投入。建議以長期投資的態度來建立相關的能力，達到世界級的水準。
- (二) 不同國家或不同民族往往面對不同的問題與對事情有不同的見解。要建立完整的技術需要考慮不同的需求與提出不同的解決方案，故廣募世界各國的人才共同建立所需的技術，有助於技術的完整建立。建議延攬他國學者，以自費或我方提供經費方式，共同參與相關技術的建立，確保技術的完整性。
- (三) 利用實習機會獲取國外已建立的能量，了解相關實務經驗與研發成果，可減少自我摸索的時間，縮短相關的學習曲線，盡早建立我方自主能力，建議多派員至國外學習未來所需的技術。

參考資料

- [1] Taking our place: University of Manitoba strategic plan (Sharing our progress, January 2015 - March 2017), University of Manitoba, 2017.
- [2] 下載於 <http://personal.cityu.edu.hk/~bsapplec/forced.htm>。
- [3] Vibration signal modeling of a planetary gear set for tooth crack detection, Xihui Liang, Ming J. Zuo, Mohammad R. Hoseini, Engineering Failure Analysis, 48(2015), p185-200.
- [4] Dynamic modeling of gearbox faults: A review, Xihui Liang, Ming J. Zuo, Zhipeng Feng, Mechanical Systems and Signal Processing, 98(2018), p852-76.

附錄一 Liang 博士的論著

Journal Papers (Published/Accepted):

- [1] F. Zhao, Z. Tian, **X. Liang**, and M. Xie “An integrated prognostics method for failure time prediction of gears subject to the surface wear failure mode,” *IEEE Transactions on Reliability*, 25 pages, accepted on Nov 24, 2017.
- [2] Y. Li, G. Li, Y. Yang, **X. Liang***, and M. Xu, “A fault diagnosis scheme for planetary gearboxes using adaptive multi-scale morphology filter and modified hierarchical permutation entropy,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 105, pp. 319-337, 2018.
- [3] **X. Liang**, H. Zhang, M. J. Zuo and Y. Qin, “Three new models for evaluation of standard involute spur gear mesh stiffness,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 101, pp. 424-434, 2018.
- [4] Y. Li, **X. Liang***, J. Lin, Y. Chen, and J. Liu, “Train axle bearing fault detection using a feature selection scheme based multi-scale morphological filter,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 101, pp. 435-448, 2018.
- [5] **X. Liang**, M. J. Zuo, and Z. Feng, “Dynamic modeling of gearbox faults: A review,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 98, pp. 852-876, 2018.
- [6] **X. Liang**, Z. Liu, M. J. Zuo, and J. Pan, “Spur gear tooth pitting propagation assessment using model-based analysis,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 30, pp. 1369-1382, 2017.
- [7] K. Li, Z. Feng, and **X. Liang**, “Planetary gearbox fault diagnosis via torsional vibration signal analysis in resonance region,” *Journal of Shock and Vibration*, vol. 2017, pp. 1-18, 2017.
- [8] Y. Li, **X. Liang**, M. Xu, and W. Huang, “Early fault diagnosis of rotating machinery by combining differential rational spline-based LMD and K-L divergence,” *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, vol. 66, pp. 3077-3090, 2017.
- [9] Y. Li, M. Xu, **X. Liang**, and W. Huang, “Application of bandwidth EMD and adaptive multi-scale morphology analysis to the incipient fault diagnosis of rolling bearing,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, pp. 6506-6517, 2017.
- [10] Z. Lu, **X. Liang**, M. J. Zuo, and J. Zhou, “Markov process based time limited dispatch analysis with constraints of both dispatch reliability and average safety levels,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 167, pp. 84-94, 2017.

- [11] Y. Li, **X. Liang**, and M. J. Zuo, “A new strategy of using time-varying structure element for mathematical morphological filtering,” *Measurement*, vol. 106, pp. 53-65, 2017.
- [12] Y. Li, **X. Liang**, M. Xu, and W. Huang, “Early fault feature extraction of rolling bearing based on ICD and tunable Q-factor wavelet transform,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 86, pp. 204-223, 2017.
- [13] Y. Li, **X. Liang**, and M. J. Zuo, “Diagonal slice spectrum assisted multi-scale morphological filter for rolling element bearing fault diagnosis,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 85, pp. 146-161, 2017.
- [14] **X. Liang**, H. Zhang, L. Liu, and M. J. Zuo, “The influence of tooth pitting on the mesh stiffness of a pair of external spur gears,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 106, pp. 1-15, 2016.
- [15] **X. Liang**, M. J. Zuo, and L. Liu, “A windowing and mapping strategy for gear tooth fault detection of a planetary gearbox,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 80, pp. 445-459, 2016.
- [16] L. Liu, **X. Liang**, and M. J. Zuo, “Vibration signal modeling of a planetary gear set with transmission path effect analysis,” *Measurement*, vol. 85, pp. 20-31, 2016.
- [17] **X. Liang**, M. J. Zuo, and M. R. Hoseini, “Vibration signal modeling of a planetary gear set for tooth crack detection,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 48, pp. 185-200, 2015.
- [18] **X. Liang**, M. J. Zuo, and M. Pandey, “Analytically evaluating the influence of crack on the mesh stiffness of a planetary gear set,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 76, pp. 20-38, 2014.
- [19] **X. Liang**, M. J. Zuo, and T. H. Patel, “Evaluating time-varying mesh stiffness of a planetary gear set using the potential energy method,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 228, pp. 535-547, 2014.
- [20] C. Zheng, Y. Shao, M. J. Zuo, and **X. Liang**, “Dynamic and quasi-static modeling of planetary gear set considering carrier misalignment error and varying line of action along tooth width,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 229, pp. 1348-1360, 2015.
- [21] R. Liu, **X. Liang**, and C. Zhang, “A feature-based approach to path planning for in-process probing operations in step-compliant NC manufacture,” *Advanced Materials Research*, vol. 422, pp. 326-330, 2012.
- [22] **X. Liang**, R. Liu, and J. Tan, “STEP-NC based NC inspection: 3D modeling and simulation,” *Modular Machine Tool & Automation Manufacturing Technique*, vol. 10, pp. 58-61, 2009. (In Chinese).

Book Chapters:

- [1] **X. Liang**, M. J. Zuo, and W. Chen, “Dynamics based vibration signal modeling of planetary gearboxes for gear tooth fault detection,” *Fault Diagnosis and Detection*, M. Demetgul and M. Ünal (Eds.), InTech, 2017, pages 175–192. Chapter 7.
- [2] **X. Liang**, M. J. Zuo, and Y. Guo, “Evaluating the time-varying mesh stiffness of a planetary gear set using the potential energy method,” *in Proceedings of the 7th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2012)*, Springer International Publishing, 2015, pages 365–374, chapter 33.

Refereed Conference Papers:

- [1] Y. Chen, **X. Liang**, and M. J. Zuo, An improved auto-regression model for representing vibration signals of a gearbox under varying operation condition, In: *Proceedings of the International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control, Xi’ an, China, August 15-17, 2018*. Submitted on Jan 30, 2018
- [2] **X. Liang**, M. J. Zuo, Z. Feng, and L. Liu, A mesh stiffness evaluation model to reflect the tooth pitting growth of a pair of external spur gears, In: *Proceedings of the Prognostics and System Health Management Conference*, Chengdu, China, October 19-21, 2016. Pages 1-6.
- [3] L. Liu, M. J. Zuo, and **X. Liang**, Dependence analysis for planetary gearbox vibration marginals, In: *Proceedings of the Prognostics and System Health Management Conference*, Chengdu, China, October 19-21, 2016. Pages 1-6.
- [4] Z. Cheng, N. Hu, **X. Liang**, and L. Liu, Fault indicator extraction based on sparse representation of redundant dictionary of vibration signal for planetary gearbox, In: *Proceedings of the Prognostics and System Health Management Conference*, Chengdu, China, October 19-21, 2016. Pages 1-4.
- [5] L. Liu, **X. Liang**, and M. J. Zuo, Vibration signal modeling for a planetary gear set, In: *Proceedings of 19th World Conference on Non-Destructive Testing*, Munich, Germany, June 13-17, 2016. Pages 1-8.
- [6] **X. Liang** and M. J. Zuo, Investigating vibration properties of a planetary gear set with a cracked tooth in a planet gear, In: *Proceedings of 2014 Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, Fort Worth, Texas, USA, Sept. 29 to Oct. 2, 2014. Pages 1-8.
- [7] **X. Liang**, M. J. Zuo, and M. Hoseini, Understanding vibration properties of a planetary gear set for fault detection, In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Prognostics and Health Management*, Spokane, Washington, USA, June 22-25, 2014. Pages 1-5.

- [8] **X. Liang** and M. J. Zuo, Dynamic simulation of a planetary gear set and estimation of fault growth on the sun gear, In: *Proceedings of the International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering*, Emeishan, Sichuan, China, July 15-18, 2013. Pages 1667-1672.
- [9] J. Tan, C. Zhang, R. Liu, and **X. Liang**, Study on framework of STEP-NC controller with on-machine inspection · In: *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*, Shanghai, China, Nov. 7-8, 2009. Pages 40-44.
- [10] J. Tan, C. Zhang, and **X. Liang**, Research on STEP-NC based machining and on-machine inspecting simulation system · In: *Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering*, Wuhan, China, Dec. 11-13, 2009. Pages 1-4.

Technical Reports:

- [1] Y. Chen, W. Tang, **X. Liang**, and M. J. Zuo, Degradation Assessment for Critical Assets in Power Generation. Technical report. Department of Mechanical Engineering, U of Alberta, Edmonton, Alberta, August 31, 2017, 40 pages.
- [2] P. Chen, K. Wang, K. S. Wang, **X. Liang**, and M. J. Zuo, Experimental description of planetary bearings with manual fault and various speed condition tests. Technical report. Department of Mechanical Engineering, U of Alberta, Edmonton, Alberta, April 26, 2017, 9 pages.
- [3] P. Chen, **X. Liang**, K. Wang, K. S. Wang, and M. J. Zuo, Descriptions and operation procedures of a rotor-bearing system with a cracked shaft. Technical report. Department of Mechanical Engineering, U of Alberta, Edmonton, Alberta, Jan 7, 2017, 6 pages.
- [4] K. Feng, Q. Ni, **X. Liang**, M. J. Zuo, K. Wang, and K. S. Wang, Experiment and data description of a lab planetary gearbox with planet gear faults. Technical report. Department of Mechanical Engineering, U of Alberta, Edmonton, Alberta, Dec 30, 2016, 12 pages.
- [5] K. Feng, **X. Liang**, K. Wang, K. S. Wang, J. Liu, and M. J. Zuo, Experiment and data description of the lab planetary gearbox with sun gear faults. Technical report. Department of Mechanical Engineering, U of Alberta, Edmonton, Alberta, March 1, 2016, 11 pages.
- [6] **X. Liang** and M. J. Zuo, Rotary gear pump overheating issues: experimental investigation and root cause analysis. Technical report. Department of Mechanical

Engineering, U of Alberta, Edmonton, Alberta, November 3, 2015, 103 pages. (With Rice Engineering & Operating Ltd, Edmonton)

- [7] **X. Liang**, L. Liu, Y. Li, and M. J. Zuo, Descriptions and operation procedures of the experimental gear pump system. Technical report. Department of Mechanical Engineering, U of Alberta, Edmonton, Alberta, October 27, 2015, 19 pages. (With Rice Engineering & Operating Ltd, Edmonton)
- [8] **X. Liang** and M. J. Zuo, Slurry pump system components and operating procedures. Technical report. Department of Mechanical Engineering, U of Alberta, Edmonton, Alberta, Feb. 2, 2015, 6 pages.
- [9] **X. Liang** and M. J. Zuo, Dynamic simulation of vibration responses from a gearbox utilizing meshing stiffness derived with the potential energy method. Technical report. Department of Mechanical Engineering, U of Alberta, Edmonton, Alberta, Oct. 14, 2014, 8 pages.
- [10] **X. Liang** and M. J. Zuo, Reliability analysis of satellite telemetered, GPS position beacons working under arctic environments. Technical report. Department of Mechanical Engineering, U of Alberta, Edmonton, Alberta, August 13, 2014, 32 pages. (With Canatec Ltd., Edmonton)
- [11] M. Pandey, T. H. Patel, **X. Liang**, T. Tian, and M. J. Zuo, Descriptions of pitting experiments, run-to-failure experiments, various load and speed experiments, and crack experiments carried out on the planetary gearbox test rig. Technical report. Department of Mechanical Engineering, U of Alberta, Edmonton, Alberta, April 30, 2011, 23 pages. (With Syncrude Canada Ltd., Edmonton)
- [12] M. Hoseini, T. H. Patel, Z. Liu, X. Zhao, R. Moghaddass, **X. Liang**, and M. J. Zuo, Dynamic simulation of planetary gearsets. Technical report. Department of Mechanical Engineering, U of Alberta, Edmonton, Alberta, June 30, 2011, 41 pages. (With Syncrude Canada Ltd., Edmonton)

Conference Presentations:

1. **X. Liang**, Z. Liu, and M. J. Zuo, Understanding vibration properties of a fixed-axis gearbox with tooth pitting, In: *Annual Seminar of Canadian Machinery Vibration Association*, Edmonton, Alberta, Canada, Oct. 25-27, 2017.
2. **X. Liang**, M. J. Zuo, Z. Feng, and L. Liu, A mesh stiffness evaluation model to reflect the tooth pitting growth of a pair of external spur gears, In: *IEEE International Conference on Prognostics and System Health Management*, Chengdu, China, October 19-21, 2016.

3. **X. Liang** and M. J. Zuo, Investigating vibration properties of a planetary gear set with a cracked tooth in a planet gear, In: *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, Fort Worth, Texas, USA, Sept. 29 to Oct. 2, 2014.
4. **X. Liang**, M. J. Zuo, and M. Hoseini, Understanding vibration properties of a planetary gear set for fault detection, In: *IEEE International Conference on Prognostics and Health Management*, Spokane, Washington, USA, June 22-25, 2014.
5. **X. Liang** and M. J. Zuo, Understanding vibration properties of a planetary gear set for fault detection, In: *Annual Seminar of Canadian Machinery Vibration Association*, Banff, Alberta, Canada, Oct. 23-25, 2013.
6. **X. Liang**, M. J. Zuo, and T. H. Patel, Evaluating time-varying mesh stiffness of a planetary gear set using the potential energy method, In: *Poster Presentation of the 3rd Faculty of Engineering Graduate Research Symposium*, U of Alberta, June 21, 2012.

Invited Presentations:

1. **X. Liang**, “Dynamics based vibration signal modeling and fault detection of planetary gearboxes,” School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, May 11, 2016.
2. **X. Liang**, “Dynamics based planetary gearbox fault detection,” Key Laboratory of Reliability Technology for Mechanical and Electrical Product of Zhejiang Province, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, May 20, 2016.

附錄二 失效模式、效應與關鍵性分析表範例

計畫名稱：_____ 參考圖號：_____

系統名稱：_____ 次系統名稱：_____ 模組：_____ 零組件：_____ 頁數：_____

| 單元／編號 | 功能規格 | 失效模式 | 失效原因 | 嚴重等級 | 失效率來源 | 失效率 λ | 失效效應 損失機率 β | 失效模式 發生機率 α | 操作 時間 t | 失效模式 關鍵性值 Cm | 項目 關鍵性值 Cr | 備註 |
|-------|------|------|------|------|-------|------------------|-------------------------|--------------------------|---------------|--------------------|------------------|----|
| | | | | | | | | | | | | |

審核者：_____ 分析者：_____ 日期：_____