

國立臺灣大學工學院機械工程學系



碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis

CNC 車床之可靠度設計與分析

Reliability Design and Analysis of CNC Lathes

陳建中

CHIEN-CHUNG CHEN

指導教授：吳文方博士

Advisor: Wen-Fang Wu, Ph.D.

中華民國 113 年 7 月

July 2024

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書
MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

CNC 車床之可靠度設計與分析
Reliability Design and Analysis of CNC Lathes

本論文係 陳建中 R11522544 在國立臺灣大學 機械工程學系 完成之碩士學位論文，於民國 113 年 7 月 8 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department / Institute of Mechanical Engineering on 8th July 2024 have examined a Master's thesis entitled above presented by Chien-Chung Chen R11522544 candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

吳文方 吳文方
(指導教授 Advisor)

林正平 林正平

李志中 李志中

系主任/所長 Director: 莊嘉揚 莊嘉揚



致謝

非常感謝一路以來身邊好夥伴們的陪伴與支持。從國中的桃胖魚團、高中的麻將與排球團、大學機械系排團，到台大野場團，每一個團體都給予我珍貴的友誼和難忘的回憶。特別要感謝 B15 的各位好兄弟，不論是在求職、學業還是球技上，你們都給了我很大的幫助和鼓勵。我也要特別感謝實驗室的好兄弟尹棠，陪伴我一起努力完成我們的口試。謝謝他提醒了我許多重要的細節，讓整個過程順利進行。對於以上提到的所有朋友，我都希望我們能夠永遠保持聯絡，讓我有機會一直做你們生命中的小丑。

在求學階段，我經歷了許多挫折和困難。但每一次的失敗都成為我前進的動力，讓我更堅定地朝著自己的目標邁進。我很慶幸自己能夠從陽明高中到海洋大學，最後順利推甄上台大研究所。這一路走來，我深深感謝自己的堅持和付出。進入台大後，我更清楚地意識到自己在各方面的不足，也明白了需要改進的地方。我期許自己在未來的職場和生活中能夠不斷進步，最終成為一個能夠被自己認可和欣賞的人。

最後，我要特別感謝我的家人們。儘管父母之間有些摩擦，但他們各自都給予了我極大的支持和精神上的鼓勵。我的姊姊也一直默默地支持著我。我先前的努力很大一部分是為了讓你們以我為榮。我不希望你們認為投資在我身上的任何心血和資源是白費的。在未來的日子裡，我會更加努力成為你們的驕傲。

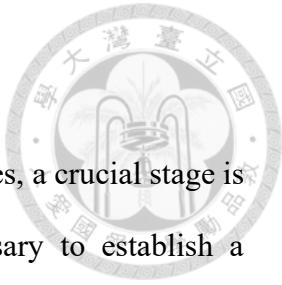
這段求學旅程讓我深刻體會到，成功不僅僅是個人的努力，更是來自於周圍人的支持和鼓勵。每一個在我生命中出現的人，都在塑造今天的我。我會永遠珍惜這些經歷，並以此為基礎，繼續在人生的道路上前進。



摘要

在 CNC (Computer Numerical Control) 車床的開發中，可靠度設計與分析是一個至關重要的環節。針對可靠度設計，需要建立一套周詳準則，將 CNC 車床被要求之系統可靠度合理分配至各子系統及零組件。就此，本研究將一 CNC 車床拆解成八個子系統，並提出七項可靠度分配準則。在每一準則中，考量子系統對系統重要程度之不同，賦予各子系統相對權重。在分析方面，本研究建構一種全面故障率分配方法，首先確認 CNC 車床整體系統之平均故障間隔時間 (Mean Time Between Failure, MTBF)，將其換算成故障率，再根據前述分配準則與權重將系統故障率合理分配至各子系統，並探討各子系統故障率、MTBF 及其它可靠度指標差異的情況。源由於所蒐尋兩岸文獻資料與數據之不同，本研究也兼探討兩岸學者在 CNC 車床可靠度研究上的差異。透過案例示範，相信本研究所提可靠度分配方法可做為 CNC 車床或其它工具機可靠度設計與分析之參考。

關鍵詞：CNC 車床、可靠度設計、可靠度分配、故障率、平均故障間隔時間



ABSTRACT

In the development of CNC (Computer Numerical Control) lathes, a crucial stage is reliability design and analysis. For reliability design, it is necessary to establish a comprehensive set of criteria to reasonably allocate the required system reliability of the CNC lathe to various subsystems and components. To this end, this study breaks down a CNC lathe into eight subsystems and proposes seven reliability allocation criteria. Within each criterion, considering the relative importance of subsystems to the overall system, relative weights are assigned to each subsystem. In terms of reliability analysis, this study constructs a comprehensive fault rate allocation method. It first determines the Mean Time Between Failure (MTBF) of the overall CNC lathe system, converts it to a fault rate, and then reasonably allocates the system fault rate to each subsystem based on the aforementioned allocation criteria and weights. The study also explores the differences in fault rates, MTBFs, and other reliability indicators among subsystems. Due to differences in the literature and data collected from both sides of the Taiwan Strait, this study also examines the disparities in CNC lathe reliability research between scholars of both sides. Through case demonstrations, we believe that the reliability allocation method proposed in this study can serve as a reference for reliability design and analysis of CNC lathes or other machine tools.

Keywords: CNC lathe, reliability design, reliability allocation, fault rate, Mean Time Between Failure (MTBF)

目次



中文摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目次.....	III
圖次.....	VI
表次.....	IX
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.3 論文架構.....	3
第二章 車床工具機概論.....	5
2.1 CNC 車床組成.....	5
2.1.1 CNC 定義.....	5
2.1.2 車床種類介紹.....	5
2.1.3 車床工作模式.....	6
2.1.4 CNC 臥式單軸車床子系統介紹.....	7
第三章 可靠度相關概論.....	9
3.1 機率基本概念以及隨機事件.....	9
3.2 可靠度概念.....	10
3.2.1 基本定義.....	10
3.2.2 常見機率分布函數.....	13
3.3 浴缸曲線.....	15
3.4 可靠度分配概論.....	16
3.4.1 可靠度分配準則.....	17
3.4.2 可靠度分配方法.....	18



3.5 系統可靠度.....	19
3.5.1 串聯系統.....	20
3.5.2 並聯系統.....	20
3.5.3 串並聯系統.....	21
3.5.4 並串聯系統.....	22
3.5.5 CNC 車床系統模型.....	23
第四章 問卷調查與分配過程及結果.....	25
4.1 不同準則下之調查結果與探討.....	25
4.1.1 故障頻率.....	25
4.1.2 故障嚴重度.....	27
4.1.3 維護困難度.....	28
4.1.4 複雜度.....	29
4.1.5 非先進製造技術度.....	30
4.1.6 工作環境劣質度.....	31
4.1.7 成本.....	33
4.2 相關矩陣與向量指標.....	34
4.2.1 故障率分配比矩陣 $\mathbf{B}^{(k)}$ 與故障率分配因子矩陣 \mathbf{F}	34
4.2.2 故障率分配因子矩陣 \mathbf{F} 矩陣.....	36
4.2.3 權重與故障率分配向量.....	36
4.3 故障率分配結果.....	37
4.3.1 CNC 車床總系統 $MTBF = 500\text{ h}$ ($\lambda_s = 0.002/\text{h}$).....	37
4.3.2 CNC 車床總系統 $MTBF = 1300\text{ h}$ ($\lambda_s = 0.00077/\text{h}$).....	38
第五章 CNC 車床系統之可靠度分析.....	39
5.1 子系統可靠度分析($MTBF = 500\text{ h}$).....	39
5.1.1 刀塔子系統.....	39



5.1.2 鎖模子系統.....	42
5.1.3 電子子系統.....	44
5.1.4 主傳動子系統.....	46
5.1.5 進給子系統.....	49
5.1.6 液壓子系統.....	51
5.1.7 冷卻子系統.....	53
5.1.8 防護子系統.....	55
5.2 子系統可靠度分析(MTBF = 1300 h).....	57
5.2.1 刀塔子系統.....	57
5.2.2 鎖模子系統.....	60
5.2.3 電子子系統.....	62
5.2.4 主傳動子系統.....	64
5.2.5 進給子系統.....	66
5.2.6 液壓子系統.....	68
5.2.7 冷卻子系統.....	70
5.2.8 防護子系統.....	72
5.3 結果與討論.....	74
第六章 結論.....	76
參考文獻.....	78
附錄.....	81

圖次



圖 3-1 韋伯分布 β 影響圖	14
圖 3-2 韋伯分布 θ 影響圖	15
圖 3-3 沐缸曲線圖	16
圖 3-4 串聯系統方塊圖	20
圖 3-5 並聯系統方塊圖	21
圖 3-6 串並聯系統方塊圖	22
圖 3-7 並串聯系統方塊圖	23
圖 3-8 十五個子系統串聯圖	23
圖 3-9 部份子系統合併圖	24
圖 3-10 八個子系統串聯圖	24
圖 5-1 刀塔子系統 $\lambda(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	40
圖 5-2 刀塔子系統 $R(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	41
圖 5-3 刀塔子系統 $f(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	42
圖 5-4 鎖模子系統 $\lambda(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	43
圖 5-5 鎖模子系統 $R(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	44
圖 5-6 鎖模子系統 $f(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	44
圖 5-7 電子子系統 $\lambda(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	45
圖 5-8 電子子系統 $R(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	46
圖 5-9 電子子系統 $f(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	46
圖 5-10 主傳動子系統 $\lambda(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	47
圖 5-11 主傳動子系統 $R(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	48
圖 5-12 主傳動子系統 $f(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	48
圖 5-13 進給子系統 $\lambda(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	50
圖 5-14 進給子系統 $R(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	50
圖 5-15 進給子系統 $f(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	51
圖 5-16 液壓子系統 $\lambda(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	52
圖 5-17 液壓子系統 $R(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	52

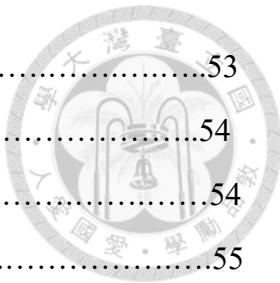


圖 5-18 液壓子系統 $f(t)$ 圖(MTBF = 500 h).....	53
圖 5-19 冷卻子系統 $\lambda(t)$ 圖(MTBF = 500 h).....	54
圖 5-20 冷卻子系統 $R(t)$ 圖(MTBF = 500 h).....	54
圖 5-21 冷卻子系統 $f(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	55
圖 5-22 防護子系統 $\lambda(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	56
圖 5-23 防護子系統 $R(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	56
圖 5-24 防護子系統 $f(t)$ 圖(MTBF = 500 h)	57
圖 5-25 刀塔子系統 $\lambda(t)$ 圖(MTBF = 1300 h)	58
圖 5-26 刀塔子系統 $R(t)$ 圖(MTBF = 1300 h)	59
圖 5-27 刀塔子系統 $f(t)$ 圖(MTBF = 1300 h)	59
圖 5-28 鎖模子系統 $\lambda(t)$ 圖(MTBF = 1300 h)	61
圖 5-29 鎖模子系統 $R(t)$ 圖(MTBF = 1300 h)	61
圖 5-30 鎖模子系統 $f(t)$ 圖(MTBF = 1300 h)	62
圖 5-31 電子子系統 $\lambda(t)$ 圖(MTBF = 1300 h)	63
圖 5-32 電子子系統 $R(t)$ 圖(MTBF = 1300 h)	63
圖 5-33 電子子系統 $f(t)$ 圖(MTBF = 1300 h)	64
圖 5-34 主傳動子系統 $\lambda(t)$ 圖(MTBF = 1300 h)	65
圖 5-35 主傳動子系統 $R(t)$ 圖(MTBF = 1300 h)	65
圖 5-36 主傳動子系統 $f(t)$ 圖(MTBF = 1300 h)	66
圖 5-37 進給子系統 $\lambda(t)$ 圖(MTBF = 1300 h)	67
圖 5-38 進給子系統 $R(t)$ 圖(MTBF = 1300 h).....	67
圖 5-39 進給子系統 $f(t)$ 圖(MTBF = 1300 h).....	68
圖 5-40 液壓子系統 $\lambda(t)$ 圖(MTBF = 1300 h).....	69
圖 5-41 液壓子系統 $R(t)$ 圖(MTBF = 1300 h).....	69
圖 5-42 液壓子系統 $f(t)$ 圖(MTBF = 1300 h).....	70
圖 5-43 冷卻子系統 $\lambda(t)$ 圖(MTBF = 1300 h).....	71
圖 5-44 冷卻子系統 $R(t)$ 圖(MTBF = 1300 h).....	71
圖 5-45 冷卻子系統 $f(t)$ 圖(MTBF = 1300 h).....	72

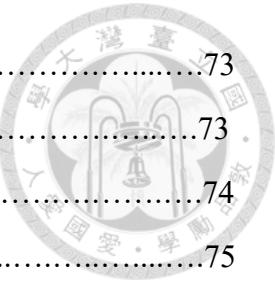


圖 5-46 防護子系統 $\lambda(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h).....	73
圖 5-47 防護子系統 $R(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h).....	73
圖 5-48 防護子系統 $f(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h).....	74
圖 5-49 不同目標 MTBF 下刀塔系統之故障率差異.....	75



表次

表 4-1 各子系統故障頻率等級.....	26
表 4-2 各子系統故障嚴重度等級.....	27
表 4-3 各子系統維護困難度等級.....	28
表 4-4 各子系統複雜度等級.....	29
表 4-5 各子系統非先進製造技術度等級.....	31
表 4-6 各子系統工作環境劣質度等級.....	32
表 4-7 各子系統成本等級.....	33
表 4-8 總系統 $MBTF = 500\text{ h}$ 下之分配結果.....	37
表 4-9 總系統 $MBTF = 1300\text{ h}$ 下之分配結果.....	38

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

在現代製造業中，數控車床 CNC (Computer Numerical Control)，為至關重要的製造工具，它能夠實現高精度、高效率加工，對提高產品質量、生產效率和降低生產成本都有重要作用。然而，隨著製造需求的不斷提高以及市場競爭的加劇，CNC 車床之可靠度和穩定性也成為了制約其應用關鍵因素之一。

在 CNC 車床的設計和開發過程中，如何確保車床可靠度為一個迫切需要解決的問題。由於 CNC 車床系統本身具有複雜之結構和功能，涉及到多個子系統和組件，單純依靠傳統經驗模式設計已經無法滿足使用者對其可靠度的要求，而有必要深入研究探討，本研究提出系統化的方法和準則，藉以改善現有 CNC 車床的經驗設計方法，並增進其可靠度。由於目前國內尚未有一套標準的 CNC 車床可靠度設計(reliability design)方法，本研究擬提出一套可重複使用的可靠度設計方法，提供國內工具機製造業參考。

可靠度設計可由可靠度分配(reliability allocation)談起，其為探討如何將被要求的系統可靠度適當分配給各子系統及零組件。本研究在為 CNC 車床進行可靠度分配時，需先釐清 CNC 車床的目標 MTBF (Mean Time Between Failure)值，將其轉換成故障率(fault rate)，再透過本研究所提出的可靠度分配方法將故障率分配給個子系統。以上過程必須考慮許多因素，其中一些因素可以定量量測，譬如說，子系統的故障頻率；另一些則需定性評估，其中準確計算提升產品可靠度所需要增加的成本支出即難以準確量化。

整體而言，我們應該應用一套綜合方法來為 CNC 車床進行可靠度分配。本研究找到並根據文獻[1][2]採用七項可靠度分配準則，提出一套兼顧各準則的可靠度分配方法，專門用於 CNC 車床的可靠度設計。因為所蒐尋兩岸文獻資料與數據之不同，本研究也將探討兩岸 CNC 車床可靠度設計研究結果上的差異，並嘗試比較





探討相關議題。

透過市場研究與調查能夠讓我們清楚掌握目前 CNC 車床的需求及面臨的挑戰，也可為本研究提供更為豐富的背景資料和實證基礎。掌握市場和技術的需求，再結合本研究所提出的可靠度設計與分析方法，應能有效提升我國 CNC 車床的品質與可靠度。

1.2 文獻回顧

可靠度分配是新產品開發中的關鍵過程，它能讓我們將一個系統所要求的故障率等可靠度指標分配給不同的子系統，致使整個系統達到所需的目標可靠度。一個好的分配方法，應能根據最新技術水平、所需成本、以及外在環境等因素，制定出最合適的可靠度分配。每個分配方法的確定都需要綜合考慮系統內在的可靠度目標及其性質，如期望的整體可靠度水平、各子系統的故障模式及相互關係，同時也需權衡外部因素的影響和約束，比如產品使用時所面臨的安全要求水平、各種環境條件、對可持續發展的要求程度、以及客戶或監管機構對產品規格嚴格程度等，這些內外交織的多重因素共同決定了適當的可靠度分配方式。

由於技術進步和系統愈趨複雜，可靠度分配方法變得越來越複雜。這導致我們需對系統掌握更詳細的知識（例如組件的故障率、操作周期和時間），並更瞭解系統分析的目標[3][4]。這一趨勢的結果是越來越先進及更結構化可靠度分配方法的出現。

由於 CNC 車床系統的複雜，本研究將把該系統拆解成八個子系統，以結構化的方式進行可靠度分配。在分配過程中，我們需考慮模態設計的適當性[5][6]，即系統在其設計規範內成功完成任務的機率，其也表明，提前研究系統的可靠度是很重要的[3][7]。

二次大戰以後，可靠度分配方法的發展取得了顯著進展，由於系統的複雜度、是否為先進製造技術產出的系統與系統的工作環境都相當重要，故美國國防部電子設備可靠度諮詢組(AGREE)[8]引入了一種廣泛使用的分配方法。此方法賦

予單元和子系統的復雜度和關鍵性更重要的角色，而不只是故障率，其中，Bracha [9]提出了一種使用以下四個因素的方法：最新技術水平、子系統復雜度（由部件數量確定）、環境條件和操作時間；Karmiol [10]則是將任務目標與系統的復雜度、最新技術水平、操作配置文件和系統的關鍵性相關聯納入可靠度分配的考量；雖他提出的分配方法非常詳細，但只能應用於串聯系統。

此外，傳統的可靠度分配方法都基於每個考慮的準則都具有相同的權重的假設，並且許多準則都是個人主觀評估的。考慮到這個缺點，本研究參考了 Chang 等人[11]、Cheng 和 Chang [12]、Chang 等人[13]及 Yager [14]提出的可靠度分配權重，並考量多項準則，透過準則讓分配結果更為全面且貼近實際案例，且利用問卷調查多位專家及學者相關權重數據讓分配結果較為客觀。

本研究所提出的可靠度分配方法可以用於串聯、並聯與混聯系統，所採用的七項分配準則可將前述負雜度、先進製造與工作環境納入考量。這種全面且靈活的分配方法不僅能夠針對不同系統類型做出最適當的可靠度分配，更能貼近實際產品開發過程中所面臨的各種挑戰與限制，將有助於提高可靠度分配結果的實用性與準確性。

1.3 論文架構

本論文一共分為六章，架構及內容如下：

- 第一章 緒論。介紹本研究之背景、動機，回顧文獻，並描述本論文架構。
- 第二章 車床種類及相關知識介紹。介紹各式車床及其工作原理，定義本文中所使用到之 CNC 車床相關名詞，並介紹與本研究相關之 CNC 車床相關知識。
- 第三章 介紹可靠度相關理論。介紹機率相關理論，並說明可靠度工程相關概念，包括系統可靠度、可靠度分配、以及韋伯分布概念。
- 第四章 問卷調查與分配結果。為獲得各子系統在各準則中的相對重要度，以及各準則的相對重要度，本研究透過問卷收集國內學者專家意見，綜合收

集到的意見，並應用所提出的分配方法進行 CNC 車床的可靠度分配。

第五章 CNC 車床系統之可靠度分析。以前述方法進行 CNC 車床系統可靠度分配，同時也探討並比較兩岸工具機之相關可靠度研究結果。

第六章 結論。



第二章 車床工具機概論



2.1 CNC 車床組成

本節將介紹 CNC 名詞定義以及簡易說明 CNC 車床系統的各子系統功能。

2.1.1 CNC 定義

CNC 是電腦數值控制(Computer Numerical Control)的簡稱。CNC 加工指的就是利用電腦出色的運算能力，控制系統進行一連串加工的意思，其中也包含 CNC 車床、CNC 銑床，與特定加工形式的車床和銑床不同，CNC 加工的重點在於「控制加工流程的是否為電腦」。搭載 CNC 的工具機能比傳統工具機生產複雜度更高的產品，有更小的誤差以及更佳的生產策略。

2.1.2 車床種類介紹

車床是一種機械加工設備，主要用於旋轉加工工件。通常用於製造圓柱形、錐形、球形等旋轉對稱的零件，例如螺紋、軸承、軸件等。車床通過旋轉工件並利用切削工具在其表面上移動，從而去除材料以形成所需的形狀和尺寸。以下是一些常見的車床種類及其簡易介紹：

1. 按自動化程度區分：

- (1) 普通車床 (Lathe)：普通車床是機械傳動、手動操作的機器。它們適用於一般零件的加工，但與其他類型的車床相比，加工精度相對較低。
- (2) 數控車床 (CNC Lathe)：數控車床由電腦控制，具有高度自動化。它們提供穩定的加工精度和高效率，適用於複雜零件和大批量生產。

2. 按床身形式區分：

- (1) 臥式車床 (Horizontal Lathe)：臥式車床的主軸水平布置，是最常見的車床類型。它們適用於加工大多數軸對稱零件。
- (2) 立式車床 (Vertical Lathe)：立式車床的主軸垂直布置，適用於加工大型、重



型工件。但與臥式車床相比，它們佔用更大的地面空間。立式車床 (Vertical Lathe)：立式車床的主軸垂直放置，工件在垂直方向上旋轉。它們通常用於加工大型和重型工件，如大型齒輪、飛輪等。

3. 按主軸數量區分：

- (1) 單軸車床(Single-Axis Lathe)：只有一個主軸，為常見的車床類型，無法同時加工多個面，生產週期較長。
- (2) 多軸車床(Multi-Axis Lathe)：多軸車床具有多個主軸，可同時加工多個面。它們包括單軸、雙軸和多軸等類型。這種車床提高了加工效率，縮短了生產週期。

以上僅為常見車床種類的介紹，根據不同的加工需求和工件特點，還有其他特殊用途的車床類型。而本研究則是針對 CNC 臥式單軸車床進行研究。

2.1.3 車床工作模式

工作模式介紹：

1. 轉削模式 (Turning Mode)：轉削是車床最基本的工作模式，也是最常見的。在轉削模式下，切削工具移動沿著工件的軸向進行切削，從而形成旋轉對稱的表面，如外圓、內孔、外圓柱等。
2. 鑽孔模式 (Drilling Mode)：鑽孔模式用於在工件上鑽孔，通常使用鑽頭或鉸孔器作為切削工具，從而形成圓形孔洞或其他形狀的孔洞。
3. 攻絲模式 (Tapping Mode)：攻絲模式用於在工件上製造內螺紋，通常使用攻絲刀具進行切削，從而形成與刀具尺寸相匹配的螺紋。
4. 銑削模式 (Milling Mode)：銑削模式用於在工件表面進行平面、曲面或複雜形狀的切削，通常使用銑刀進行切削，從而形成所需的形狀和尺寸。
5. 研磨模式 (Grinding Mode)：研磨模式用於在工件表面進行高精度的研磨加工，通常使用砂輪等研磨工具進行切削，從而達到所需的表面精度和光潔度。

以上是一些常見的車床工作模式，根據加工需求和工件特點，可以靈活地選擇適

合的工作模式進行加工操作。

2.1.4 CNC 臥式單軸車床子系統介紹



現今市面上的 CNC 臥式單軸車床主要是由以下 15 個子系統以及構造所構成[1]：

1. 刀塔子系統 (Turret)：刀塔子系統是一種方便的刀具座，通常可以容納多個切削刀具，以便在單個工作階段中進行多次切削操作，提高加工效率。
2. 鎖模子系統 (Clamping System)：鎖模子系統負責將工件夾緊、鎖緊以利加工進行。它確保工件在加工過程中保持穩定，避免移動或震動。
3. 電子子系統 (Electric System)：電子子系統是 CNC 車床的基本電氣組件，主要由電阻、電容器和電感組成，負責執行加工過程中的各種電力相關工作。
4. 電源子系統 (Power System)：電源系統提供機床所需的電力，以驅動各種電動設備和控制系統，確保機床正常運行。
5. CNC 子系統 (CNC System)：CNC 子系統是控制整個車床操作的核心部分，通過電腦控制各種運動、速度和切削參數，實現精確的工件加工。
6. 伺服子系統 (Servo System)：伺服子系統控制車床各個軸運動，使用伺服馬達和相應的控制器實現高精度、高速度的運動控制。
7. 主傳動子系統 (Main Drive System)：主傳動子系統連接產生動力的馬達或發電機以及驅動輪，實現加工操作。
8. 主軸組件 (Spindle Assembly)：主軸組件是負責保持和旋轉切削工具或工件的關鍵部分，影響加工精度和表面質量。
9. X 進給子系統 (X-axis Feed System)：控制刀具在水平方向移動的關鍵部分。
10. Z 進給子系統 (Z-axis Feed System)：控制刀具在垂直方向移動的關鍵部分。
11. 潤滑子系統 (Lubrication System)：潤滑子系統確保機床運行順暢、減少磨損，延長零件壽命。
12. 屑料輸送子系統 (Chip Conveyor System)：用於移動和管理加工過程中的切屑或切削廢料，保持工作區清潔，提高生產效率。

- 
13. 液壓子系統 (Hydraulic System)：控制和調節液壓油的壓力和流量，實現各種工件夾持、刀具運動和機床動作，確保加工過程的穩定性和精度。
 14. 冷卻子系統 (Cooling System)：控制和維持加工過程中的溫度，確保工件和刀具在高速切削中保持冷卻，防止過熱損壞。
 15. 防護子系統 (Safety System)：保護操作人員、機器和工件免受意外事故或損壞，確保工作環境安全。

第三章 可靠度相關理論

本章第一節將介紹機率基本概念，第二節說明可靠度基本定義，以及其各種機率分布函數，第三節說明浴缸曲線的走勢與意義，第四節講述可靠度分配理論與本研究所參考的分配分法，第五節則說明一般系統可靠度之計算方法。



3.1 機率基本概念以及隨機事件

在可靠度工程中，失效可以被視為一種隨機事件。設 X 為一隨機事件，其發生機率可以表示為 $P(X)$ ，其中 $0 \leq P(X) \leq 1$ 。若 $P(X) = 0$ 則此事件被視為不可能發生， $P(X) = 1$ 則表示該事件必定發生[15][16]。若 $P(X)$ 越接近 1，則該事件發生的可能性越大。

若定義 X 的反面事件為 \bar{X} ，例如 X 代表失效，則 \bar{X} 代表不失效，由於 X 與 \bar{X} 必定有一個事件會發生，故可得：

$$P(X) + P(\bar{X}) = 1 \quad (3-1a)$$

$$P(\bar{X}) = 1 - P(X) \quad (3-1b)$$

若假設一系統中有兩個單元，事件 X 表示單元 1 失效，事件 Y 表示單元 2 失效。則交集 $X \cap Y$ 代表兩單元都失效的事件，其機率為 $P(X \cap Y)$ ，其中 $P(X \cap Y) = P(Y \cap X)$ 。而 $X \cup Y$ 表示兩單元任一失效的事件，其機率為 $P(X \cup Y)$ ，其中 $P(X \cup Y) = P(Y \cup X)$ [15][16]。根據以上對兩事件以及交集、聯集之定義，我們可以定義以下幾種事件之關係：

1. 條件分布(conditional distribution)

$P(X|Y)$ 表示在事件 Y 發生之前提下，事件 X 發生之機率，可寫為：

$$P(X|Y) = \frac{P(X \cap Y)}{P(Y)} \quad (3-2)$$

其中 $P(X \cap Y) = P(X|Y)P(Y) = P(Y|X)P(X)$ 。

2. 獨立事件(independent)

若事件 X 與事件 Y 彼此獨立，則 $P(X \cap Y) = P(X)P(Y)$ ，也就是說 $P(X|Y) =$

$P(X) \cdot P(Y|X) = P(Y)$ 。則兩事件的聯集可寫為：

$$P(X \cup Y) = P(X) + P(Y) - P(X)P(Y) = 1 - P(\bar{X})P(\bar{Y}) \quad (3-3)$$



3. 互斥事件(exclusive)

若事件 X 與事件 Y 彼此互斥，則 $P(X \cap Y) = 0$ ，也就是說 $P(X|Y) = P(Y|X) = 0$ 。則兩事件的聯集可寫為：

$$P(X \cup Y) = P(X) + P(Y) \quad (3-4)$$

3.2 可靠度概念

可靠度工程的研究起源於二戰期間，當時大量複雜的電子設備被廣泛應用於戰爭中。然而，這些電子設備的高失效率逐漸引起了人們的關注。例如，許多美軍武器在運輸或存儲期間就已經失效，導致在作戰時無法發揮作用。許多空軍設備的維修和維護成本甚至達到了原始採購成本的十倍以上。起初，人們將問題歸咎於製造過程中操作員或品檢人員的疏忽。然而，1952 年美國軍方成立了美國電子設備可靠度顧問團 (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment, AGREE)，其研究報告指出產品品質與時間、操作環境以及要求性能之間存在密切關係。他們進一步將可靠度定義為產品在特定的使用環境和條件下，在規定時間內成功完成任務的機率[16]。

可靠度工程涵蓋了可靠度理論的多個方面，是一門基於概率和統計的學科。其內涵包括可靠度數學、可靠度工程和可靠度管理。可靠度數學提供了描述可靠度的工具語言，可靠度工程則涉及到設計、製造、測試和驗證等專業技術。而可靠度管理則是將上述各方面有效地結合起來，以實現產品可靠度達標[16]。

3.2.1 基本定義

1. 可靠度函數(reliability function)

可靠度被定義為特定之系統或單元，在一定的時間 t 內正常工作(即未失效)之機率。若定義一個連續隨機變數(continuous random variable) T ，代表此單元或



系統在失效之前正常工作的總時間，其中 $T \geq 0$ ，則可靠度函數可表示為：

$$R(t) = \Pr\{T \geq t\} \quad (3-5)$$

其具有下列特性：

- (1) $1 \geq R(t) \geq 0$ ，表示可靠度介於 0 到 1 之間
- (2) $R(0) = 1$ ，意即在時間為 0 時可靠度為 1
- (3) $\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$ ，表示當時間趨近無窮大時，可靠度為 0

2. 累積分布函數(cumulative distribution function, CDF)

若使用累積分布函數表示系統或單元在時間 t 前失效之機率，將其數學式可以被定義為：

$$F(t) = 1 - R(t) = \Pr\{T < t\} \quad (3-6)$$

其具有下列特性：

- (1) $1 \geq F(t) \geq 0$ ，表示在時間 t 內的失效機率介於 0 到 1 之間
- (2) $F(0) = 0$ ，意即在時間為 0 時失效機率為 0
- (3) $\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$ ，表示當時間趨近無窮大時，失效機率為 1

3. 機率密度函數(probability density function, PDF)

機率密度函數被定義為：

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (3-7)$$

此方程式描述了失效的分布形狀，其具有下列特性：

- (1) $f(t) \geq 0$ ，其不為負值
- (2) $\int_0^\infty f(t)dt = 1$ ，可參照累積分布函數特性(b)(c)，表示其曲線下面積總和為 1
- (3) $F(t) = \int_0^t f(t')dt'$ 且 $R(t) = \int_t^\infty f(t')dt'$ ，表示 $F(t)$ 為 $f(t)$ 在時間 t 以前之曲線下之面積， $R(t)$ 則為 $f(t)$ 在時間 t 以後之曲線下面積， $F(t)$ 與 $R(t)$ 兩



者總合為 1(3-6)

4. 平均失效時間(mean time to failure, MTTF)

平均失效時間之數學式可表達為：

$$MTTF = E(t) = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (3-8)$$

其為可靠度函數曲線下面積，通常用於描述之平均可用時間，又稱平均壽命。

5. 平均故障時間(Mean Time Between Failure, MTBF)

平均故障時間 (Mean Time Between Failure, MTBF)與平均失效時間 (Mean Time To Failure, MTTF)兩者為非常相近之名詞，其數學式(3-8)也相同，兩者之差別為 MTBF 為可修復或重複性之系統或單元，而 MTTF 為不可修復或一次性之系統或單元，在本文中 CNC 車床的各項子系統皆視為可修復或重複性之系統，故所使用的名詞定義為 MTBF。

6. 故障率函數 (Failure Rate Function)

故障率函數常用於可靠度分析中，又稱為風險比函數(hazard rate function)，用於表示在時間 t 之前未發生失效，則在下個階段前發生失效的機率。可表示為：

$$Pr\{t \leq T \leq t + \Delta t | T \geq t\} = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \quad (3-9)$$

表示自時間 t 到時間 $t + \Delta t$ 之間發生失效的機率，若要求得單元時間發生失效的機率則將式(3-9)同除以 Δt 得到

$$\frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)\Delta t} \quad (3-10)$$

進一步將 Δt 設為趨近於 0，即可得到在時間為 t 的當下瞬間發生失效的機率，將其以 $\lambda(t)$ 表達：

$$\lambda(t) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)\Delta t} = -\frac{dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3-11)$$



3.2.2 常見機率分布函數

1. 常態分布(normal distribution)

又稱為高斯分布 (Gaussian distribution) , 其分布走勢由標準差 (standard deviation) σ 以及平均值 (mean) μ 決定 , 若 t 為符合常態分布之隨機變數 , 其機率密度函數可表示為

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\frac{(t-\mu)^2}{\sigma^2}\right], -\infty < t < \infty \quad (3-12)$$

其可靠度函數為 $R(t) = \int_t^{\infty} f(t')dt'$, 由於此函數之積分無封閉解 , 因此必須採用數值解 , 通常將其標準化並設為

$$z = \frac{T - \mu}{\sigma} \quad (3-13)$$

將累積分布函數以及可靠度函數表示為式(3-14)及(3-15)之形式 , 並經由 z 值查表得到 Φ 之值 。

$$F(t) = \Phi\left(\frac{T - \mu}{\sigma}\right) \quad (3-14)$$

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{T - \mu}{\sigma}\right) \quad (3-15)$$

2. 對數常態分布(lognormal distribution)

此分布為對 t 取對數所得到的分布 , 若 t 為符合對數常態分布之隨機變數 , 則取其自然變數必符合常態分布 , 其機率密度函數可表示為 :

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}st} \exp\left[-\frac{1}{2s^2}\left(\ln\frac{t}{t_{med}}\right)^2\right], t \geq 0 \quad (3-16)$$

其中 s 為形狀參數 (shape parameter) , t_{med} 為位置參數 (location parameter) 表示失效時間之中位數。其累積分布函數以及可靠度函數為

$$F(t) = \Phi\left(\frac{1}{s} \ln \frac{t}{t_{med}}\right) \quad (3-17)$$

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{1}{s} \ln \frac{t}{t_{med}}\right) \quad (3-18)$$



3. 韋伯分布(Weibull distribution)

韋伯分佈是在可靠度工程中常見的機率分佈模型，它可以用來表示失效率($\lambda(t)$)為定值、遞增與遞減三種情況(取決於 β 的大小)，其失效率($\lambda(t)$)可表示為以下形式：

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1}, \theta > 0, \beta > 0, t \geq 0 \quad (3-19)$$

其可靠度可表示為：

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau} = e^{-(\frac{t}{\theta})^\beta} \quad (3-20)$$

其中 MTTF (MTBF)、 θ 與 β 的關係式為：

$$\text{MTTF (MTBF)} = \theta \Gamma(1 + \frac{1}{\beta}) \quad (3-21)$$

其中 $\Gamma(x)$ 之值可以透過查表獲得。在此分布中 β 代表了形狀參數，其可控制可靠度機率密度函數(PDF)的圖形，其對於分布影響如圖 3-1 所示。

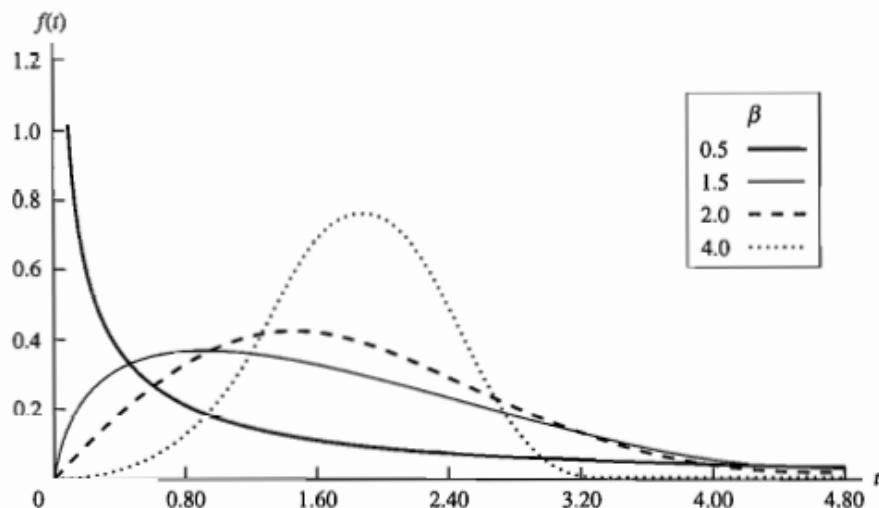


圖 3-1 韋伯分布 β 影響圖[16]

當 $\beta < 0$ 時，PDF 趨近於指數分佈。當 β 數較大 (ex. $\beta \geq 3$) 時 PDF 類似為對稱圖形，如常態分佈。當 $1 < \beta < 3$ 時，PDF 為偏態分佈。當 $\beta = 1$ 時， $\lambda(t)$ 為定值，

且 PDF 為指數分佈。而 θ 代表大小參數，其影響了 PDF 的平均值或散佈的程度，其對於分佈影響如下圖

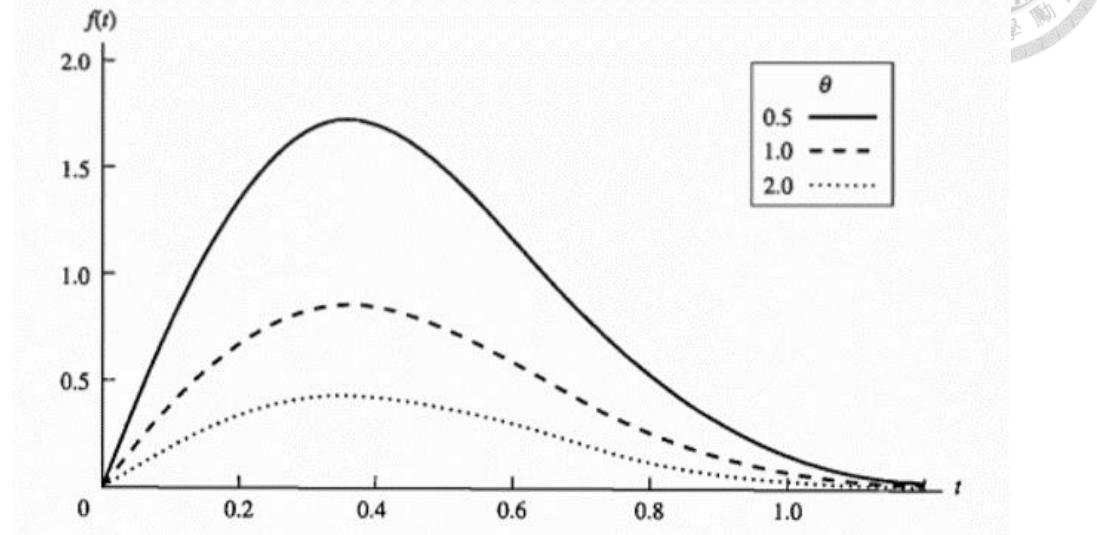


圖 3-2 韋伯分佈 θ 影響圖[16]

3.3 浴缸曲線

可靠度浴缸曲線是可靠度工程中常用的概念之一，用於描述產品或系統在不同壽命階段的可靠度特徵。它通常以圖形的形式呈現，橫軸表示時間，縱軸表示可靠度或失效率。

浴缸曲線之所以稱為「浴缸」，是因為其形狀類似於一個浴缸。這條曲線通常分為三個階段：

1. 初始故障期 (Burn-in)：在產品剛開始使用時，可能會出現大量的早期故障，這個階段的可靠度通常較低。曲線在此時期通常呈現一個陡峭的下降。
2. 有用生命期 (Useful life)：產品經過了初始故障期後，進入了正常使用期。在這個階段，產品的可靠度保持相對穩定，並且在一個較高水平上。這段時間內，產品的失效率通常是穩定的，呈現一段水平的直線。
3. 老化期 (Wear-out)：隨著使用時間的增加，產品的某些部件可能會由於磨損或老化而出現故障，導致可靠度開始下降。在這個階段，產品的失效率逐漸增加，可靠度曲線再次呈現下降趨勢。



浴缸曲線之分部如圖 3-3 所示

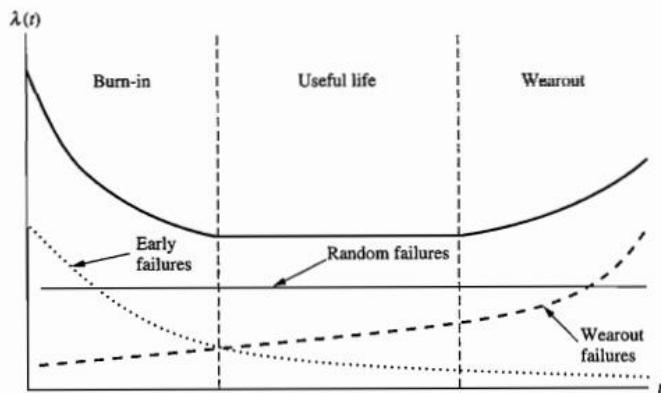


圖 3-3 浴缸曲線圖[16]

可靠度浴缸曲線的形狀和特徵對產品的設計和維護具有重要的指導意義。通過了解產品在不同壽命階段的可靠度表現，可以採取相應的措施來提高產品的可靠度和壽命。

3.4 可靠度分配概論

可靠度分配(reliability allocation)是一種管理方法，旨指在產品或系統設計階段有效地分配可靠度目標或資源，以實現所需的整體可靠度水平。該理論主要應用於工程和系統設計領域，通過合理地分配資源和設定目標，以確保產品或系統在特定條件下能夠達到預期的可靠度水平。

可靠度分配的基本原理是將可靠度目標分配給系統的不同組成部分或子系統，以確保整體系統能夠滿足預定的可靠度要求。這種分配通常是基於系統分析、風險評估和性能需求進行的，以最大程度地提高系統的整體可靠性和性能。

在可靠度分配理論中，有幾個關鍵概念需要理解：

1. 分配方法： 可靠度分配方法可以根據系統的特性和需求採用不同的策略。常見的分配方法包括等分配法、成本效益分配法、重要度權重分配法等。
2. 資源優化： 可靠度分配的目標是在給定的資源約束條件下，通過合理分配資源來實現最優的可靠度水平。這意味著需要在系統的各個方面進行權衡和優化，以最大限度地提高系統的整體可靠度。



3. 風險管理：可靠度分配也涉及到風險管理，即對系統可能面臨的各種風險進行識別、評估和應對。通過合理的資源分配和風險控制措施，可以降低系統面臨的潛在風險，並提高系統的可靠度和穩定性。
4. 性能需求：可靠度分配需要根據系統的性能需求和使用環境來確定可靠度目標。這些性能需求可能涉及到系統的工作條件、使用壽命、安全性要求等方面，對於不同的應用場景，可靠度目標也會有所不同。

3.4.1 可靠度分配準則[1][2]

本研究參考文獻[1][2]，列出以下可靠度分配的七大準則：

1. 子系統故障頻率：

由於經常用舊的 CNC 車床故障資料來設計新的 CNC 車床，若發現原本故障頻率就高的子系統，則將它分配至高可靠度，且在新設計中可以按比例提高不同子系統的可靠度，以便在新設計中提高全系統可靠度。

2. 子系統故障的嚴重度：

子系統故障的嚴重程度代表了其故障對整體車床系統、周圍環境和操作人員的影響，綜合反映了故障發生的機率和嚴重程度。如果子系統的故障可能導致操作員受傷或機器及其周圍財產的損壞，則該子系統故障的嚴重度很高，子系統的嚴重度與可靠度分配有直接關係，故障嚴重程度高的子系統應分配高可靠度。

3. 子系統維護困難度：

維護困難度與其在按要求執行指定的維護任務時恢復的能力相關。維修成本或停機時間越高或越長，子系統的維護困難度越高。維護困難度越高的子系統應配置高的可靠度。

4. 子系統複雜度：

子系統的複雜度定義為子系統內的關鍵元件（其故障將導致子系統故障）的數量與整個 CNC 車床中此類關鍵零件總數的比率，子系統的複雜度越高，子系統發生故障的頻率就越高。如果一個子系統由許多關鍵部件組成，那麼



提高其可靠度就更加困難。因此，複雜度高的子系統應該被分配高的可靠度。

5. 子系統非先進製造技術度：

對於採用先進製造技術名生產出的子系統，其可靠度相對容易保證。對於生產技術較不純熟的子系統來說，較難保證高可靠度。因此採用非先進製造技術名生產的子系統應分配到較高的可靠度。

6. 子系統工作環境劣質度：

工作環境是指子系統必須工作的溫度、濕度、振動、電磁干擾、污染、腐蝕等，它還考慮了運行時間要求，子系統的工作條件越差，其可靠度就越難保證。因此工作狀況差的子系統應配置高可靠度。

7. 子系統成本：

在CNC車床設計中，我們的最終目標是在滿足系統可靠度要求的前提下，最大限度地降低整個系統的設計、開發、製造、運作和維護的總成本。在子系統之間的可靠度分配中，需要在各子系統的可靠度和成本之間尋求平衡，因此對可靠度的成本敏感度越高，提高子系統可靠度的成本就越大。對可靠度成本敏感度較高的子系統應分配較高的可靠度。

透過以上七種準則，我們可以對目標系統的子系統或子單元進行全面的考量並將其分配至合適之可靠度。

3.4.2 可靠度分配方法[1]

根據前一章之七種分配準則，定義 $\beta_{ij}^{(k)}$ 代表了在考慮第 k 分配準則下，第 i 子系統與第 j 子系統的故障率分配相對比， $\beta_{ij}^{(k)} > 0.5$ 代表第 i 個子系統要分配到比第 j 個子系統更高的故障率， $\mathbf{B}^{(k)}$ 代表在考慮第 k 分配準則下故障率分配比矩陣 $(c * c)$ (在文獻[1]中 $p = 7$ ， $c = 15$)



$$\mathbf{B}^{(k)} = \begin{bmatrix} \beta_{11}^{(k)} & \dots & \beta_{1c}^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{c1}^{(k)} & \dots & \beta_{cc}^{(k)} \end{bmatrix}, k = 1, 2, 3, \dots, p \quad (3-22)$$

在 $\mathbf{B}^{(k)}$ 中的每一列(row)代表特定子系統和其他每一個子系統的故障率分配比例，其中每一列(row)的平均值(γ)表示基於分配準則 k 的子系統 i 的相對分配因子。其定義為

$$\gamma_{ki} = \frac{1}{c} \sum_{j=1}^c \beta_{ij}^{(k)}, k = 1, 2, 3, \dots, p, i = 1, 2, \dots, c \quad (3-23)$$

矩陣 \mathbf{F} 表示所有子系統和所有分配準則的相對故障率分配因子

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \dots & \gamma_{1c} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{k1} & \dots & \gamma_{kc} \end{bmatrix} \quad (3-24)$$

接著所有子系統的故障率分配向量(\mathbf{A})為：

$$\mathbf{A} = \mathbf{WF} \quad (3-25)$$

$$\mathbf{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_c\}$$

其中 \mathbf{W} 為權重向量，且 $\mathbf{W} = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$ ，其中 w_k ($1 \leq k \leq 7$) 代表第 k 個分配準則的權重或重要性。在本研究中，我們透過問卷調查專家學者的意見來設定 w_k 。

子系統故障率分配方法為：

$$\lambda_i = \frac{a_i}{\sum_{j=1}^c a_j} \lambda_s^* \quad (3-26)$$

其中 λ_s^* 為 CNC 車床總系統的目標故障率， λ_i 為子系統故障率。最後通過上式即可分配出每個子系統的故障率。

3.5 系統可靠度[16]

在系統中，兩個單元通常以串聯或並聯兩種主要的形式相互連接。在理解單元可靠度的計算之後，需要首先了解其組成系統的排列方式，才能進行整體系統的可靠度計算。



3.5.1 串聯系統(series system)

串聯系統中的每個單元或子系統都必須正常運作才能使整個系統正常運作，當其中任何一個單元或子系統失效時，則整個系統失效，其方塊圖如圖 3-4 所示。

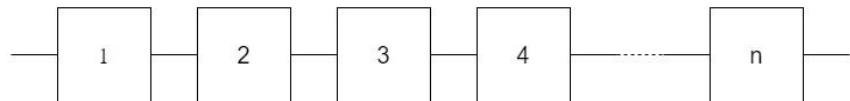


圖 3-4 串聯系統方塊圖[16]

若以 R_s 表示此系統可靠度，設此系統中共有 n 個單元或子系統，則此串聯系統之可靠度可由數學式表達為

$$R_s = P(E_1 \cap E_2 \cap E_3 \cap E_4 \cap \dots \cap E_n) \quad (3-27)$$

其中 E 代表各單元或子系統正常運作之事件，若皆為獨立事件，即任一單元或子系統之失效與否不影響其他單元或子系統，此方法可以設計出較簡易且保險的可靠度，式(3-27)可簡化為

$$R_s = P(E_1)P(E_2)P(E_3)P(E_4) \dots P(E_n) = R_1R_2R_3R_4 \dots R_n = \prod_{i=1}^n R_i \quad (3-28)$$

其中 R_i 為第 i 個單元或子系統之可靠度。

3.5.2 並聯系統(parallel system)

並聯系統中只要有任一單元或子系統正常運作，則整個系統即可正常運作，即當所有單元或子系統皆失效時系統才會失效，其方塊圖如圖 3-5 所示。

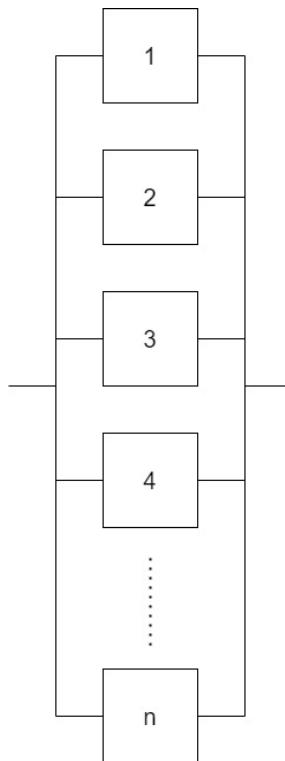


圖 3-5 並聯系統方塊圖[16]

若以 R_s 表示此系統可靠度，設此系統中共有 n 個單元或子系統，則此並聯系統可靠度可由數學式表達為

$$\begin{aligned} R_s &= P(E_1 \cup E_2 \cup E_3 \cup E_4 \cup \dots \cup E_n) \\ &= 1 - P(E_1^c \cap E_2^c \cap E_3^c \cap E_4^c \cap \dots \cap E_n^c) \end{aligned} \quad (3-29)$$

其中 E 代表各單元或子系統正常運作之事件， E^c 則代表各單元或子系統失效之事件，若皆為獨立事件，即任一單元或子系統之失效與否不影響其他單元或子系統，則式(3-29)可簡化為

$$R_s = 1 - P(E_1^c)P(E_2^c)P(E_3^c)P(E_4^c) \dots P(E_n^c) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (3-30)$$

其中 R_i 為第 i 個單元或子系統之可靠度。

3.5.3 串並聯系統(series-parallel system)

串並聯系統由多個並聯系統互相串聯組成，同時具有串聯系統及並聯系統之特性，其方塊圖如圖 3-6 所示。

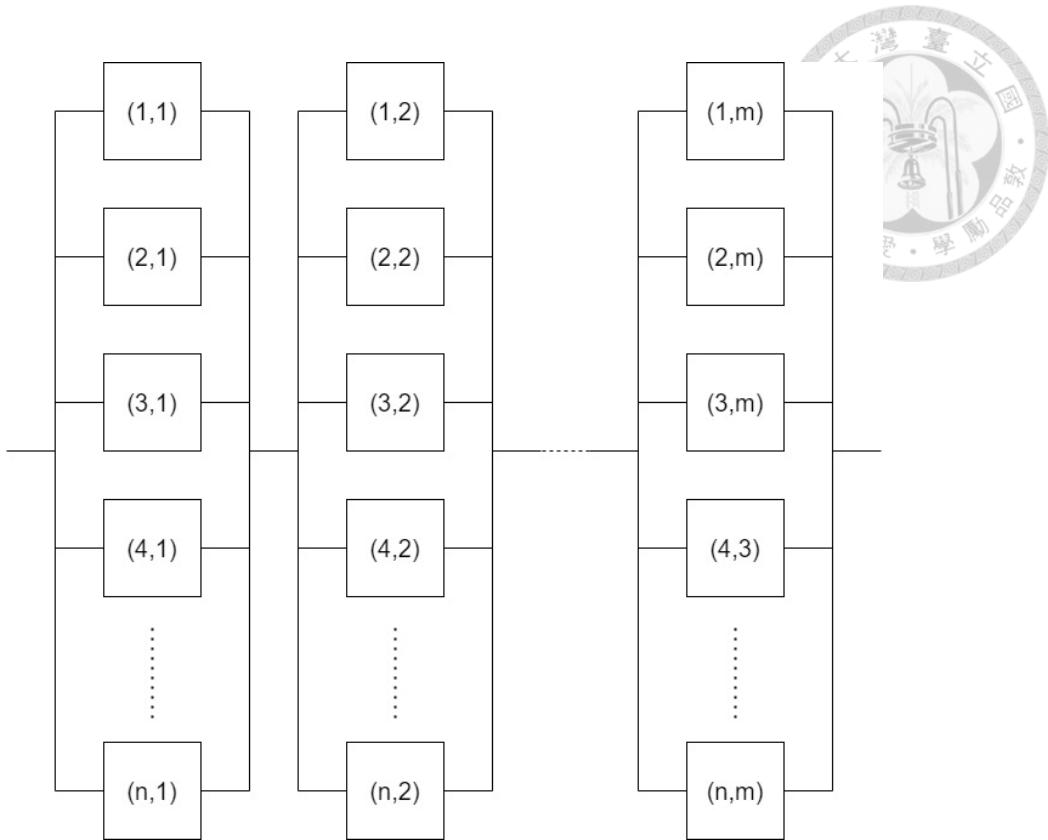


圖 3-6 串並聯系統方塊圖[16]

以 R_s 表示此系統可靠度，並聯系統由 n 個單元或子系統組成，再串聯 m 次，其可靠度可參照式(3-30)寫為

$$R_s = \left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \right]^m \quad (3-31)$$

3.5.4 並串聯系統(parallel-series system)

並串聯系統由多個串聯系統互相並聯組成，同時具有串聯系統及並聯系統之特性，其可靠度方塊圖如圖 3-7 所示。

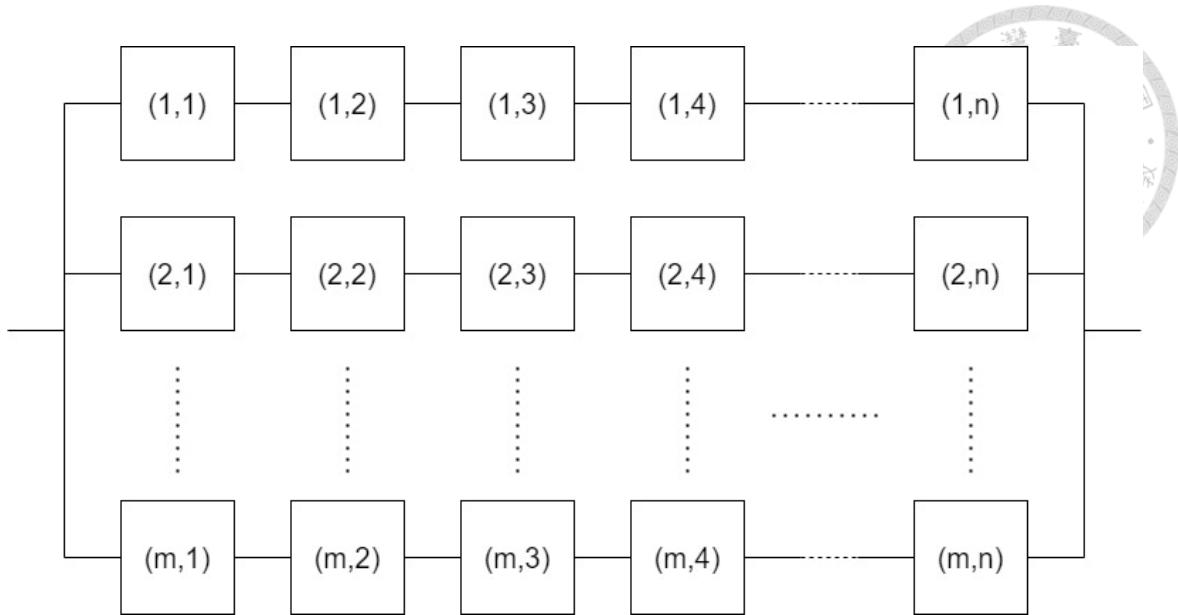


圖 3-7 並串聯系統方塊圖[16]

以 R_s 表示此系統可靠度，串聯系統由 n 個單元或子系統組成，再並聯 m 次，其可靠度可參照式(3-28)及(3-30)寫為

$$R_s = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^n R_i \right)^m \quad (3-32)$$

3.5.5 CNC 車床系統模型(CNC Lathe System Model)

本節將定義本研究中所使用到的假設，首先由於串聯中總系統的可靠度為各子系統乘積，故可以設計出較簡易與保險的可靠度，所以我們假設 CNC 車床子系統為串聯且個自獨立的系統，接著根據文獻[1][17]可做出以下由 15 個子系統所組成的 CNC 車床系統模型

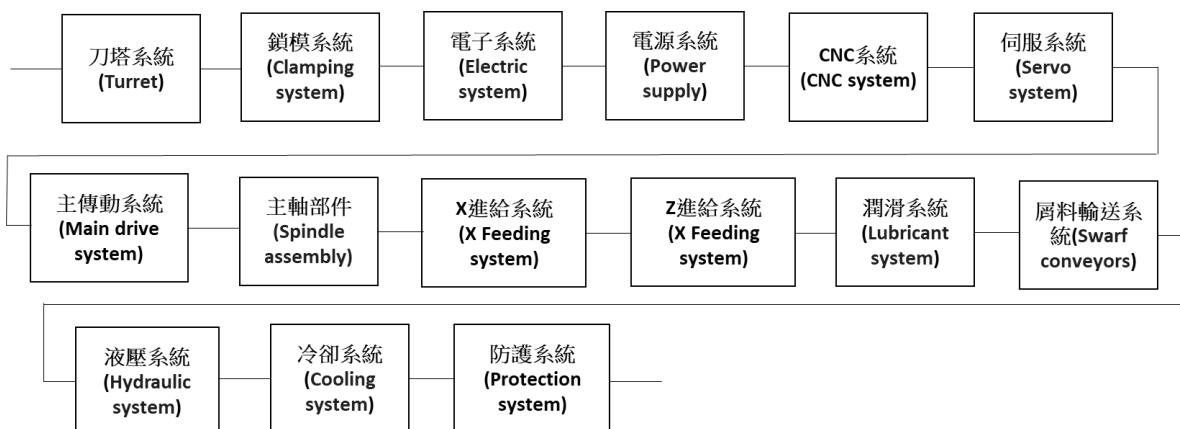


圖 3-8 十五個子系統串聯圖

為了計算與調查方便，我們將 15 個子系統的部分系統簡化與合併

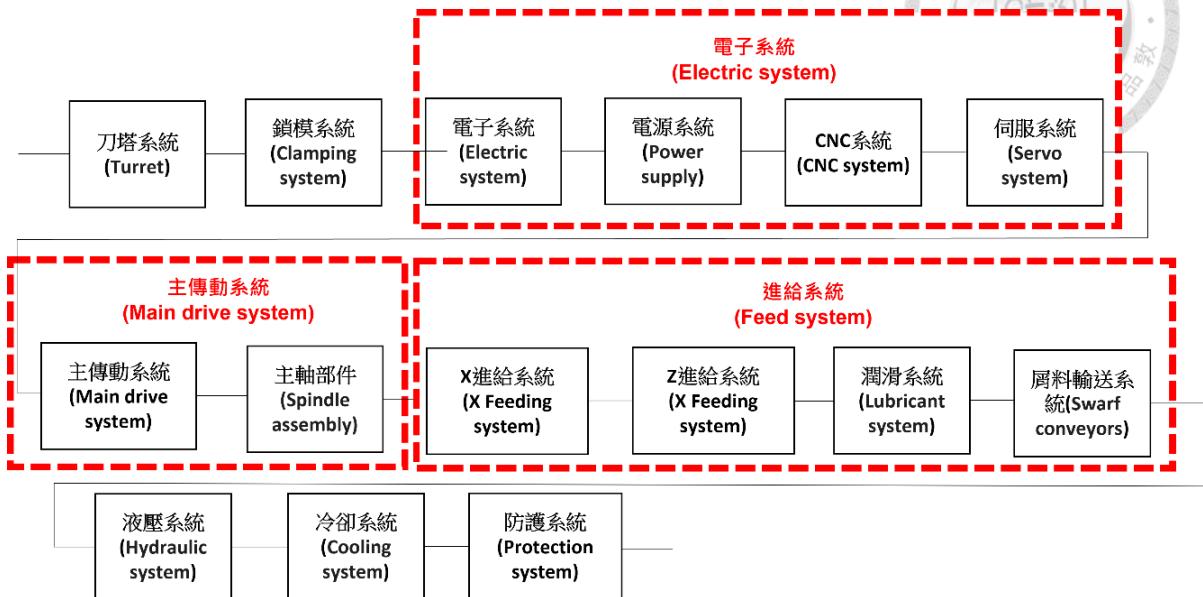


圖 3-9 部份子系統合併圖

最後形成了構成本研究 CNC 車床系統的 8 個子系統模型

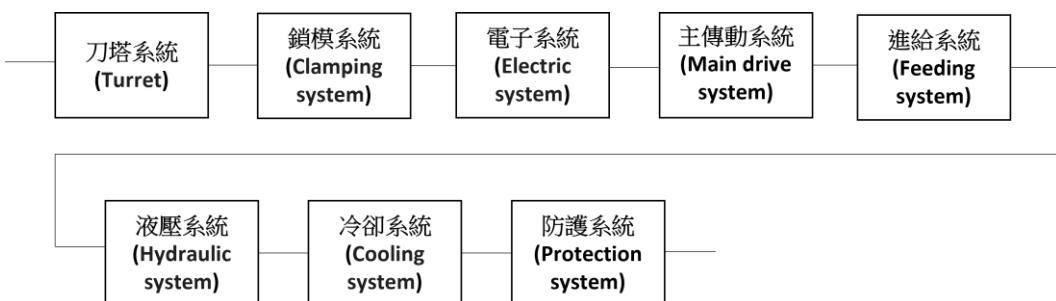


圖 3-10 八個子系統串聯圖

在定義好系統模型後，我們假設所有子系統可靠度分佈皆符合韋伯分佈，故在後續的計算中皆使用韋伯之可靠度計算式子。

第四章 問卷調查與分配過程及結果

本章將顯示附錄的調查結果，並將其統計與微調後產出在七個準則下八個子系統分別的重要性度量(Importance Measure)，再將其帶入前述分配方法並分配出在不同 CNC 車床總系統 MTBF 標準下的 CNC 車床子系統故障率。

4.1 不同準則下之調查結果與探討

本節將顯示出透過問卷調查在不同準則下對於不同子系統之重要度等級，並且透過比較此項調查與對岸文獻[1]，探討兩岸對於 CNC 車床在不同準則下的看法與原因。

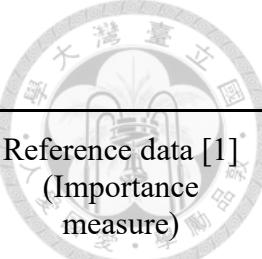
4.1.1 故障頻率

故障頻率分配準則式：

$$\beta_{ij}^{(1)} = \frac{f_i}{f_i + f_j} \quad (4-1)$$

其中 f_i 和 f_j 分別是第 i 個子系統和第 j 個子系統的故障頻率等級，根據統計學者與業界專家所填寫的問卷可列出各子系統故障頻率等級數據表如表 4-1 並將其與參考文獻[1]進行比較，我們可以對其進行兩岸對 CNC 車床子系統在此準則下的重視度探討：

表 4-1 各子系統故障頻率等級



Symbol of subsystems (subsystem ID)	Subsystem	Failure frequency level (Importance measure)	Reference data [1] (Importance measure)
T (1)	Turret	0.0853 (8)	0.2714 (1)
C (2)	Clamping system	0.1022 (6)	0.0999 (4)
E (3)	Electric system	0.1584 (1)	0.2452 (2)
M (4)	Main driving system	0.1499 (2)	0.0979 (5)
F (5)	Feeding system	0.1447 (3)	0.2008 (3)
H (6)	Hydraulic system	0.1311 (4)	0.0414 (6)
B (7)	Cooling system	0.1262 (5)	0.0353 (7)
P (8)	Protection system	0.1022 (6)	0.0081 (8)

在故障頻率方面，在多篇中國文獻中都認為刀塔子系統與電子子系統的故障頻率一定排在前三高內，如[18][19][20]，而台灣則認為複雜度高的電子子系統與主傳動子系統為前兩大主要故障子系統，與文獻[21]吻合，至於刀塔子系統反而故障頻率排在最後的系統，跟中國大陸文獻相差甚遠。造成此項結果的主要原因可能是認知的不同，中國大陸學者或許認為其他系統的失效也會導致刀塔子系統的故障，如機械原因(預緊力過大、內部機械卡死等)、電氣原因(電源不通、電動機不轉等)、鎖模原因(鎖不緊等)，而台灣學者則是分開思考，認為刀塔子系統只有小部分參與加工，故故障頻率最低。

在故障頻率的分佈方面，中國大陸車床子系統故障頻率最大與最小的系統相差了有 30 幾倍之多而台灣子系統故障頻率最大與最小的系統相差僅僅不到兩倍，這或許可以反映出台灣目前工具機產業在技術方面領先中國，故在各系統的技術與品質方面皆做得相當完善所以差異不大，而中國則差異甚大。



4.1.2 故障嚴重度

故障嚴重度分配準則式：

$$\beta_{ij}^{(2)} = \frac{cr_j}{cr_i+cr_j} \quad (4-2)$$

其中 CR_i 和 CR_j 分別是第 i 個子系統和第 j 個子系統的故障嚴重度等級，根據統計學者與業界專家所填寫的問卷可列出各子系統故障嚴重度等級數據表如表 4-2 並將其與參考文獻[1]進行比較，我們可以對其進行兩岸對 CNC 車床子系統在此準則下的重視度探討：

表 4-2 各子系統故障嚴重度等級

Symbol of subsystems (subsystem ID)	Subsystem	Failure criticality level (Importance measure)	Reference data [1] (Importance measure)
T (1)	Turret	0.1101 (7)	0.2659 (1)
C (2)	Clamping system	0.1146 (6)	0.2355 (2)
E (3)	Electric system	0.1381 (3)	0.1350 (3)
M (4)	Main driving system	0.1468 (1)	0.0877 (5)
F (5)	Feeding system	0.1409 (2)	0.0777 (6)
H (6)	Hydraulic system	0.1306 (4)	0.0698 (7)
B (7)	Cooling system	0.1160 (5)	0.1020 (4)
P (8)	Protection system	0.1029 (8)	0.0264 (8)

在故障嚴重度方面，文獻[17]認為刀塔子系統的故障是嚴重度最高的，且如電子子系統與鎖模子系統等會造成刀塔子系統故障的系統的故障嚴重度也很高，因若其失效導致加工件夾不緊、滑出等，可能會直接危及到操作人為的生命安全。

而台灣學者則認為嚴重程度相差不大，但又已決定主軸最高轉速、變速以及

扭力的主傳動子系統的故障最為嚴重。電子子系統在本論文與文獻[17][21]中的故障嚴重度都排在相對較高的位子，這也與文獻[22]不謀而合。



4.1.3 維護困難度

維護困難度分配準則式：

$$\beta_{ij}^{(3)} = \frac{m_i}{m_i + m_j} \quad (4-3)$$

其中 m_i 和 m_j 分別是第 i 個子系統和第 j 個子系統的維護困難度等級，根據統計學者與業界專家所填寫的問卷可列出各子系統維護困難度等級數據表如表 4-3 並將其與參考文獻[1]進行比較，由於維護困難度與下一項準則(複雜度)有很大關聯我們將於下一項準則後再將兩者一起進行兩岸對 CNC 車床子系統在此兩項準則下的重視度探討：

表 4-3 各子系統維護困難度等級

Symbol of subsystems (subsystem ID)	Subsystem	Maintenance difficulty level (Importance measure)	Reference data [1] (Importance measure)
T (1)	Turret	0.0953 (8)	0.1389 (3)
C (2)	Clamping system	0.1134 (6)	0.0933 (6)
E (3)	Electric system	0.1332 (3)	0.0586 (8)
M (4)	Main driving system	0.1528 (1)	0.1173 (5)
F (5)	Feeding system	0.1456 (2)	0.1250 (4)
H (6)	Hydraulic system	0.1312 (4)	0.0829 (7)
B (7)	Cooling system	0.1260 (5)	0.1721 (2)
P (8)	Protection system	0.1024 (7)	0.2118 (1)



4.1.4 複雜度

複雜度分配準則式：

$$\beta_{ij}^{(4)} = \frac{c_i}{c_i + c_j} \quad (4-4)$$

其中 c_i 和 c_j 分別是第 i 個子系統和第 j 個子系統的複雜度等級，根據統計學者與業界專家所填寫的問卷可列出各子系統複雜度等級數據表如表 4-4 並將其與參考文獻[1]進行比較，我們可以將其與前一項準則(維護困難度)一起進行兩岸對 CNC 車床子系統在此兩項準則下的重視度探討：

表 4-4 各子系統複雜度等級

Symbol of subsystems (subsystem ID)	Subsystem	Complexity level (Importance measure)	Reference data [1] (Importance measure)
T (1)	Turret	0.0847 (8)	0.2174 (2)
C (2)	Clamping system	0.0988 (7)	0.1087 (4)
E (3)	Electric system	0.1552 (2)	0.2754 (1)
M (4)	Main driving system	0.1569 (1)	0.1014 (5)
F (5)	Feeding system	0.1465 (3)	0.2029 (3)
H (6)	Hydraulic system	0.1287 (4)	0.0580 (6)
B (7)	Cooling system	0.1216 (5)	0.0290 (7)
P (8)	Protection system	0.1075 (6)	0.0072 (8)

在維護困難度與系統複雜度方面，對於我國，基本上只要子系統越複雜則維護就越困難，反之從中國大陸文獻的數據來看，有些子系統相對不複雜但卻是相對難維護的。這也許也反映了我國因為技術的純熟，所以是否容易維護只取決於子系統的複雜度，在文獻[1]方面的某些子系統雖然不複雜，但或許是缺乏了某些關鍵技術造成維護較困難。

在文獻[23]中提到軸承的失效會導致較長的停機時間，在車床系統中軸承會存在於四個主要的地方，主軸(通常由軸承支撐，以支持工件夾持裝置和切削刀具的轉動)、導軌(使用軸承來確保刀具或工件在運動中的平穩移動)、馬達(如主軸馬達、進給馬達等)、傳動系統(在任何傳動系統中，如變速箱或傳動帶輪，也可能使用軸承)，而這四處剛好又存在於本研究維修困難度的前兩名(主傳動子系統、進給子系統)中。文獻[21]中也有圖表顯示進給系統故障所造成的停機時間是所有系統中最久的。文獻[24]則透過幾個綜合性指標最後表示進給系統是最難維護的，這些都和本研究與文獻[1]大致吻合。

4.1.5 非先進製造技術度

非先進製造技術度分配準則式：

$$\beta_{ij}^{(5)} = \frac{t_i}{t_i+t_j} \quad (4-5)$$

其中 t_i 和 t_j 分別是第 i 個子系統和第 j 個子系統的非先進製造技術度等級，根據統計學者與業界專家所填寫的問卷可列出各子系統非先進製造技術度等級數據表如表 4-5 並將其與參考文獻[1]進行比較，我們可以對其進行兩岸對 CNC 車床子系統在此準則下的重視度探討：

表 4-5 各子系統非先進製造技術度等級

Symbol of subsystems (subsystem ID)	Subsystem	Manufacturing technology level (Importance measure)	Reference data [1] (Importance measure)
T (1)	Turret	0.1456 (1)	0.2857 (1)
C (2)	Clamping system	0.1223 (5)	0.2041 (2)
E (3)	Electric system	0.1188 (6)	0.0583 (7)
M (4)	Main driving system	0.1240 (3)	0.1050 (5)
F (5)	Feeding system	0.1116 (8)	0.1137 (4)
H (6)	Hydraulic system	0.1240 (3)	0.1166 (3)
B (7)	Cooling system	0.1188 (6)	0.0875 (6)
P (8)	Protection system	0.1349 (2)	0.0292 (8)

如前述，由於我國技術已純熟，故製造先進度差異不大，最大與最小值相差不到 1.5 倍。而中國大陸則相差接近 10 倍。

4.1.6 工作環境劣質度

工作環境劣質度分配準則式：

$$\beta_{ij}^{(6)} = \frac{q_i}{q_i + q_j} \quad (4-6)$$

其中 q_i 和 q_j 分別是第 i 個子系統和第 j 個子系統的工作環境劣質度等級，根據統計學者與業界專家所填寫的問卷可列出各子系統工作環境劣質度等級數據表如表 4-6 並將其與參考文獻[1]進行比較。

表 4-6 各子系統工作環境劣質度等級

Symbol of subsystems (subsystem ID)	Subsystem	Poor quality of work condition level (Importance measure)	Reference data [1] (Importance measure)
T (1)	Turret	0.1262 (6)	0.2735 (1)
C (2)	Clamping system	0.1262 (6)	0.2165 (2)
E (3)	Electric system	0.1039 (8)	0.0484 (7)
M (4)	Main driving system	0.1205 (4)	0.1254 (3)
F (5)	Feeding system	0.1393 (1)	0.1140 (4)
H (6)	Hydraulic system	0.1354 (2)	0.0969 (5)
B (7)	Cooling system	0.1280 (3)	0.0855 (6)
P (8)	Protection system	0.1205 (4)	0.0399 (8)

在工作環境劣質度方面，台灣學者認為工作環境最惡劣的第一名為會暴露於金屬碎屑和切削液，且承受持續的機械運動和摩擦的進給子系統；第二為可能面臨油液洩漏和污染，長期工作可能導致油溫升高的液壓子系統；第三為直接接觸切削液和金屬碎屑，且長期處於潮濕環境，可能面臨化學腐蝕的冷卻子系統。中國則是將上述皆排在靠後的排名，且第一名為暴露於高溫、高壓的切削環境，受到金屬碎屑和切削液的持續衝擊，並承受高速旋轉和頻繁切換帶來的機械應力的刀塔子系統。

造成此極大不同的可能原因為：

1. 加工材料的不同：台灣在精密電子、半導體等領域有較強的優勢，這些行業通常涉及較軟材料的加工，切削條件相對溫和；而中國可能更多涉及硬質材料的大規模加工的重工業，導致更惡劣的切削環境。
2. 保養維護習慣的差異：台灣可能有更嚴格的設備維護制度，使得設備始終保



持良好狀態；中國的維護可能不那麼頻繁或徹底，導致環境惡化。

4.1.7 成本

成本分配準則式：

$$\beta_{ij}^{(7)} = \frac{CO_i}{CO_i + CO_j} \quad (4-7)$$

其中 CO_i 和 CO_j 分別是第 i 個子系統和第 j 個子系統的成本等級，根據統計學者與業界專家所填寫的問卷可列出各子系統成本等級數據表如表 4-7 並將其與參考文獻[1]進行比較，我們可以對其進行兩岸對 CNC 車床子系統在此準則下的重視度探討：

表 4-7 各子系統成本等級

Symbol of subsystems (Subsystem ID)	Subsystem	Cost level (Importance measure)	Reference data [1] (Importance measure)
T (1)	Turret	0.0925 (8)	0.1541 (3)
C (2)	Clamping system	0.1126 (6)	0.1101 (5)
E (3)	Electric system	0.1395 (2)	0.1415 (4)
M (4)	Main driving system	0.1597 (1)	0.1761 (2)
F (5)	Feeding system	0.1395 (2)	0.2830 (1)
H (6)	Hydraulic system	0.1293 (4)	0.0629 (6)
B (7)	Cooling system	0.1159 (5)	0.0566 (7)
P (8)	Protection system	0.1110 (7)	0.0157 (8)

在製造成本方面，根據本研究與文獻[3]的結果都顯示主傳動子系統與進給子系統為所有子系統中製造成本相對高的，而防護子系統則是子系統中相對低的。而由於大陸擁有廉價的零組件、原材料(如鋼、鐵等)故在各子系統的總成本又會比台灣的低。



4.2 相關矩陣與向量指標

本節將顯示依據上述計算出的 $\beta_{ij}^{(k)}$ 合併成七種 $\mathbf{B}^{(k)}$ 矩陣，接著計算出 γ_{ki} 並合併至矩陣 \mathbf{F} 再透過調查獲得的權重向量 \mathbf{W} 、式(3-24)與(3-25)分配出最後的故障率分配向量(\mathbf{A})。

4.2.1 故障率分配比矩陣 $\mathbf{B}^{(k)}$ 與故障率分配因子矩陣 \mathbf{F}

透過式(3-22)我們可將故障率分配比矩陣列出，由於故障率分配比矩陣表達的是在第 k 準則下各子系統間的故障率分配比，如第一列第一欄表達的是第一個子系統相對於自己的故障率分配比，第一列第二欄表示第一個子系統相對於第二個子系統，依此類推。由矩陣我們可以觀察到由於矩陣中的(1,1)、(2,2)、(3,3)等等的皆表示為自己相對於自己的故障率分配相對比故皆為 0.5。而在矩陣中可以發現在每個 0.5 的上一列與左一欄或上兩列與左兩欄依此類推他們互相相加的值皆為 1，這也相當合理，由於如(1,2)、(2,1)等等的項表達的是第一個子系統相對於第二個子系統與第二個子系統相對於第一個子系統，故彼此之間的互相相對相加一定是 1。

$$\mathbf{B}^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.45 & 0.35 & 0.36 & 0.37 & 0.39 & 0.40 & 0.45 \\ 0.55 & 0.50 & 0.39 & 0.41 & 0.41 & 0.44 & 0.45 & 0.50 \\ 0.65 & 0.61 & 0.50 & 0.51 & 0.52 & 0.55 & 0.56 & 0.61 \\ 0.64 & 0.59 & 0.49 & 0.50 & 0.51 & 0.53 & 0.54 & 0.59 \\ 0.63 & 0.59 & 0.48 & 0.49 & 0.50 & 0.52 & 0.53 & 0.59 \\ 0.61 & 0.56 & 0.45 & 0.47 & 0.48 & 0.50 & 0.51 & 0.56 \\ 0.60 & 0.55 & 0.44 & 0.46 & 0.47 & 0.49 & 0.50 & 0.55 \\ 0.55 & 0.50 & 0.39 & 0.41 & 0.41 & 0.44 & 0.45 & 0.50 \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

$$\mathbf{B}^{(2)} = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.49 & 0.44 & 0.43 & 0.44 & 0.46 & 0.49 & 0.52 \\ 0.51 & 0.50 & 0.45 & 0.44 & 0.45 & 0.47 & 0.50 & 0.53 \\ 0.57 & 0.55 & 0.50 & 0.48 & 0.49 & 0.51 & 0.54 & 0.57 \\ 0.57 & 0.56 & 0.52 & 0.50 & 0.51 & 0.53 & 0.56 & 0.59 \\ 0.56 & 0.55 & 0.51 & 0.49 & 0.50 & 0.52 & 0.55 & 0.58 \\ 0.54 & 0.53 & 0.49 & 0.47 & 0.48 & 0.50 & 0.53 & 0.56 \\ 0.51 & 0.50 & 0.46 & 0.44 & 0.45 & 0.47 & 0.50 & 0.53 \\ 0.48 & 0.47 & 0.43 & 0.41 & 0.42 & 0.44 & 0.47 & 0.50 \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

$$\mathbf{B}^{(3)} = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.46 & 0.42 & 0.38 & 0.40 & 0.42 & 0.43 & 0.48 \\ 0.54 & 0.50 & 0.46 & 0.43 & 0.44 & 0.46 & 0.47 & 0.53 \\ 0.58 & 0.54 & 0.50 & 0.47 & 0.48 & 0.50 & 0.51 & 0.57 \\ 0.62 & 0.57 & 0.53 & 0.50 & 0.51 & 0.54 & 0.55 & 0.60 \\ 0.60 & 0.56 & 0.52 & 0.49 & 0.50 & 0.53 & 0.54 & 0.59 \\ 0.58 & 0.54 & 0.50 & 0.46 & 0.47 & 0.50 & 0.51 & 0.56 \\ 0.57 & 0.53 & 0.49 & 0.45 & 0.46 & 0.49 & 0.50 & 0.55 \\ 0.52 & 0.47 & 0.43 & 0.40 & 0.41 & 0.44 & 0.45 & 0.50 \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

$$\mathbf{B}^{(4)} = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.46 & 0.35 & 0.35 & 0.37 & 0.40 & 0.41 & 0.44 \\ 0.54 & 0.50 & 0.39 & 0.39 & 0.40 & 0.43 & 0.45 & 0.48 \\ 0.65 & 0.61 & 0.50 & 0.50 & 0.51 & 0.55 & 0.56 & 0.59 \\ 0.65 & 0.61 & 0.50 & 0.50 & 0.52 & 0.55 & 0.56 & 0.59 \\ 0.63 & 0.60 & 0.49 & 0.48 & 0.50 & 0.53 & 0.55 & 0.58 \\ 0.60 & 0.57 & 0.45 & 0.45 & 0.47 & 0.50 & 0.51 & 0.54 \\ 0.59 & 0.55 & 0.44 & 0.44 & 0.45 & 0.49 & 0.50 & 0.53 \\ 0.56 & 0.52 & 0.41 & 0.41 & 0.42 & 0.46 & 0.47 & 0.50 \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

$$\mathbf{B}^{(5)} = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.54 & 0.55 & 0.54 & 0.57 & 0.54 & 0.55 & 0.52 \\ 0.46 & 0.50 & 0.51 & 0.50 & 0.52 & 0.50 & 0.51 & 0.48 \\ 0.45 & 0.49 & 0.50 & 0.49 & 0.52 & 0.49 & 0.50 & 0.47 \\ 0.46 & 0.50 & 0.51 & 0.50 & 0.53 & 0.50 & 0.51 & 0.48 \\ 0.43 & 0.48 & 0.48 & 0.47 & 0.50 & 0.47 & 0.48 & 0.45 \\ 0.46 & 0.50 & 0.51 & 0.50 & 0.53 & 0.50 & 0.51 & 0.48 \\ 0.45 & 0.49 & 0.50 & 0.49 & 0.52 & 0.49 & 0.50 & 0.47 \\ 0.48 & 0.52 & 0.53 & 0.52 & 0.55 & 0.52 & 0.53 & 0.50 \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

$$\mathbf{B}^{(6)} = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.50 & 0.55 & 0.51 & 0.48 & 0.48 & 0.50 & 0.51 \\ 0.50 & 0.50 & 0.55 & 0.51 & 0.48 & 0.48 & 0.50 & 0.51 \\ 0.45 & 0.45 & 0.50 & 0.46 & 0.43 & 0.43 & 0.45 & 0.46 \\ 0.49 & 0.49 & 0.54 & 0.50 & 0.46 & 0.47 & 0.49 & 0.50 \\ 0.52 & 0.52 & 0.57 & 0.54 & 0.50 & 0.51 & 0.52 & 0.54 \\ 0.52 & 0.52 & 0.57 & 0.53 & 0.49 & 0.50 & 0.51 & 0.53 \\ 0.50 & 0.50 & 0.55 & 0.51 & 0.48 & 0.49 & 0.50 & 0.51 \\ 0.49 & 0.49 & 0.54 & 0.50 & 0.46 & 0.47 & 0.49 & 0.50 \end{bmatrix} \quad (4-13)$$

$$\mathbf{B}^{(7)} = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.45 & 0.40 & 0.37 & 0.40 & 0.42 & 0.44 & 0.45 \\ 0.55 & 0.50 & 0.45 & 0.41 & 0.45 & 0.47 & 0.49 & 0.50 \\ 0.60 & 0.55 & 0.50 & 0.47 & 0.50 & 0.52 & 0.55 & 0.56 \\ 0.63 & 0.59 & 0.53 & 0.50 & 0.53 & 0.55 & 0.58 & 0.59 \\ 0.60 & 0.55 & 0.50 & 0.47 & 0.50 & 0.52 & 0.55 & 0.56 \\ 0.58 & 0.53 & 0.48 & 0.45 & 0.48 & 0.50 & 0.53 & 0.54 \\ 0.56 & 0.51 & 0.45 & 0.42 & 0.45 & 0.47 & 0.50 & 0.51 \\ 0.55 & 0.50 & 0.44 & 0.41 & 0.44 & 0.46 & 0.49 & 0.50 \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

4.2.2 故障率分配因子F矩阵

透過式(3-23)與(3-24)將上列七個矩陣合併成故障率分配因子矩陣F，其為前一小節中每個故障率分配比矩陣B^(k)中的每一列的平均值，如(1,1)表示在第1個準則下第一個子系統相對於其他所有子系統的故障率分配比平均值，(1,2)表示在第1個準則下第二個子系統相對於其他所有子系統的故障率分配比平均值依此類推，此作法考慮的更為全面，可以得到在每個準則下每個子系統的故障率分配因子。

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0.41 & 0.47 & 0.56 & 0.55 & 0.54 & 0.52 & 0.51 & 0.46 \\ 0.47 & 0.48 & 0.53 & 0.54 & 0.53 & 0.51 & 0.48 & 0.45 \\ 0.44 & 0.48 & 0.52 & 0.55 & 0.54 & 0.52 & 0.51 & 0.45 \\ 0.41 & 0.45 & 0.56 & 0.56 & 0.55 & 0.51 & 0.50 & 0.47 \\ 0.54 & 0.50 & 0.49 & 0.50 & 0.47 & 0.50 & 0.55 & 0.52 \\ 0.50 & 0.50 & 0.45 & 0.50 & 0.53 & 0.52 & 0.51 & 0.50 \\ 0.43 & 0.48 & 0.53 & 0.56 & 0.53 & 0.51 & 0.48 & 0.47 \end{bmatrix} \quad (4-15)$$

4.2.3 權重與故障率分配向量

權重向量(W)：

$$\mathbf{W} = \{ 0.18 \ 0.17 \ 0.15 \ 0.13 \ 0.12 \ 0.12 \ 0.13 \}$$

透過式(3-24)，最後可計算出故障率分配向量(A)

$$\mathbf{A} = \{ 0.45 \ 0.48 \ 0.52 \ 0.54 \ 0.53 \ 0.51 \ 0.50 \ 0.47 \}$$

最後透過式(3-26)我們便可以得到各子系統之故障率分配結果。



4.3 故障率分配結果

本節將先定義 CNC 車床總系統之 MTBF 並透過前述式子來對子系統做最後的故障率分配。

4.3.1 CNC 車床總系統 $MTBF = 500 \text{ h}$ ($\lambda_s = 0.002/\text{h}$)

根據文獻[1]定義車床總系統 $MTBF = 500 \text{ h}$ ，並利用式(3-26)分配出以下各子系統之故障率(λ_i)如表 4-8，並將數據與該文獻進行比較

表 4-8 總系統 $MTBF = 500 \text{ h}$ 下之分配結果

Symbol of subsystems (subsystems ID)	Subsystem	Allocated failure rate (λ_i) (Importance measure)	Reference data [1] (Importance measure)
T (1)	Turret	0.00023 (8)	0.00032 (1)
C (2)	Clamping system	0.00024 (6)	0.00029 (2)
E (3)	Electric system	0.00026 (3)	0.00025 (5)
M (4)	Main driving system	0.00027 (1)	0.00026 (4)
F (5)	Feeding system	0.00027 (1)	0.00028 (3)
H (6)	Hydraulic system	0.00026 (3)	0.00025 (5)
B (7)	Cooling system	0.00025 (5)	0.00021 (7)
P (8)	Protection system	0.00024 (6)	0.00014 (8)

4.3.2 CNC 車床總系統 MTBF = 1300 h ($\lambda_s = 0.00077/h$)

根據文獻[25]定義車床系統 MTBF = 1300 h，並利用(3-26)分配出以下各子系統之故障率(λ_i)，並將數據與文獻[1]進行比較



表 4-9 總系統 MBTF=1300 h 下之分配結果

Symbol of subsystems	Subsystem	Allocation failure rate (λ_i) (Importance measure)	Reference data [1] (Importance measure)
T (1)	Turret	0.000087 (8)	0.00038 (1)
C (2)	Clamping system	0.000092 (6)	0.00030 (2)
E (3)	Electric system	0.000100 (3)	0.00022 (6)
M (4)	Main driving system	0.000104 (1)	0.00025 (5)
F (5)	Feeding system	0.000102 (2)	0.00026 (3)
H (6)	Hydraulic system	0.000098(4)	0.00026 (3)
B (7)	Cooling system	0.000096 (5)	0.00022 (6)
P (8)	Protection system	0.000090 (7)	0.00014 (8)

第五章 CNC 車床系統之可靠度分析

本章將透過前述介紹的可靠度分配方法，藉由文獻[1]所提出的分配準則與方法，以傳統系統可靠度的觀點來計算 CNC 車床系統在符合韋伯分佈下不同 β 值之可靠度。

5.1 子系統可靠度分析(MTBF = 500 h)

本節將透過符合韋伯分佈基本的可靠度運算來進行各子系統在總系統 MTBF = 500 h 時之可靠度分析。

5.1.1 刀塔子系統

透過 4.3.1 小節可知刀塔子系統經分配過後可得

$$\lambda_1(t) = 0.00023 \quad (5-1a)$$

此時相當於 $\beta=1$ ，故障率為一定值，透過式(3-21)我們可計算出在相同 MTBF 下不同 β 值下之 θ 值，並計算出不同 $\lambda_1(t)$ 。

$\beta=0.5$

$$\lambda_1(t) = 1.07*10^{-2}t^{-0.5} \quad (5-1b)$$

$\beta=1.5$

$$\lambda_1(t) = 4.49*10^{-6}t^{0.5} \quad (5-1c)$$

$\beta=2$

$$\lambda_1(t) = 8.31*10^{-8}t \quad (5-1d)$$

$\beta=4$

$$\lambda_1(t) = 7.56*10^{-15}t^3 \quad (5-1e)$$

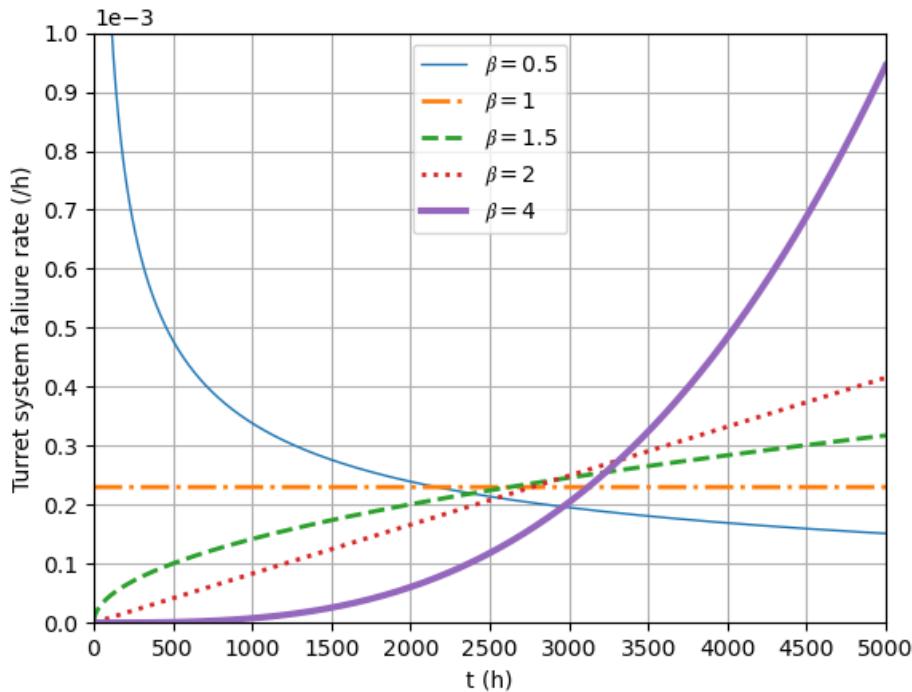


圖 5-1 刀塔子系統 $\lambda(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

根據韋伯分佈與浴缸曲線，由本章的所有故障率與時間關係圖如圖 5-1、5-4、5-7...5-46 依此類推我們可以看出 CNC 車床各子系統在符合早期失效期($\beta = 0.5$)、有用生命期($\beta = 1$)與老化期($\beta = 1.5$ 、 1 、 2 、 4)時之故障率分布，由於工具機子系統之故障率分布應較符合老化期之分布，故我們繪製出三種不同的老化期走勢。且本研究認為最接近刀塔子系統故障率分佈的為 $\beta = 4$ 時(因為車床各子系統之損耗應該為疊加狀態)。

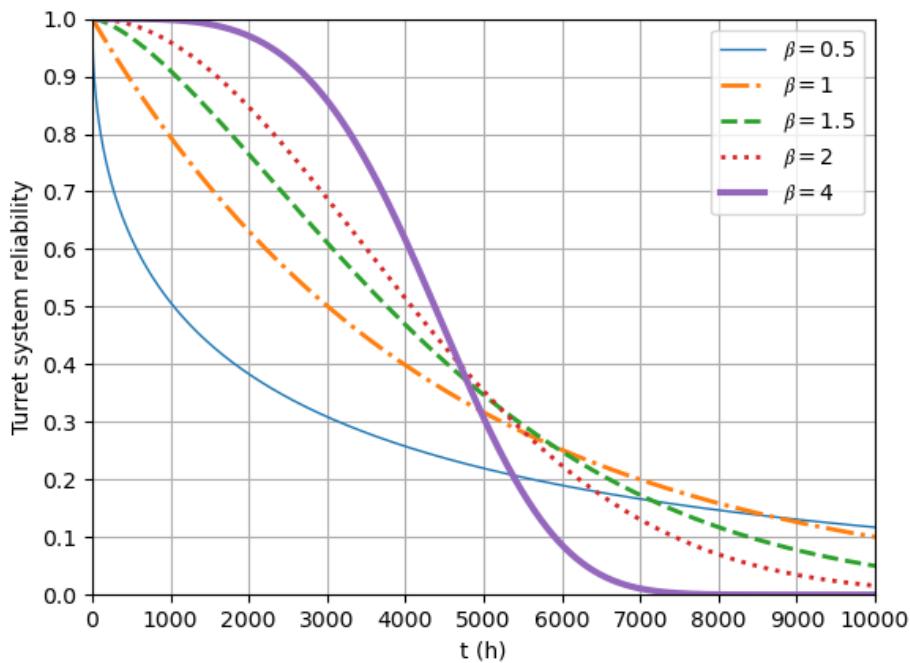


圖 5-2 刀塔子系統 $R(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

在本章所有可靠度與時間關係圖方面如圖 5-2、5-5、5-8...5-47 依此類推，系統($\beta = 4$)在大約 2500 hr 後便快速下降，一直到在時間(t)為大約 4800 hr 以前，系統之可靠度在所有 β 值中都還是最高的，但在 4800 hr 以後便迅速小於所有其他分佈，故若要讓一個系統能常維持長久不故障，一定要進行保養與維護的動作。

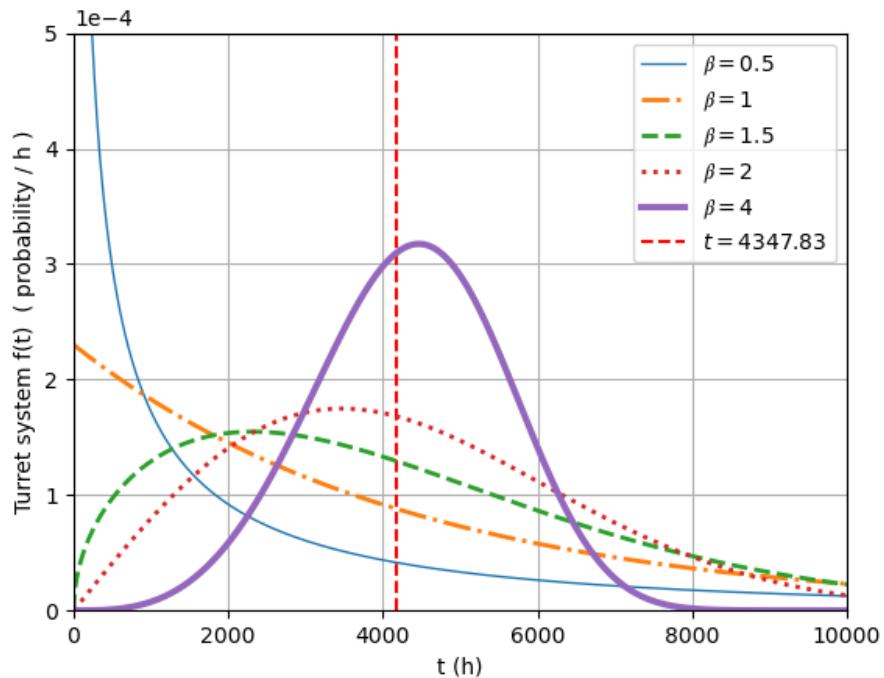


圖 5-3 刀塔子系統 $f(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

在本章所有機率分布與時間關係圖方面如圖 5-3、5-6、5-9…5-48 依此類推，我們可以得知在各個分布中最有可能發生故障之時間以及其機率，並標示出了各子系統的 MTBF 值做為參考。

5.1.2 鎮模子系統

透過 4.3.1 小節可知鎮模子系統經分配過後可得

$$\lambda_2(t) = 0.00024 \quad (5-2a)$$

此時相當於 $\beta=1$ ，故障率為一定值，透過式(3-21)我們可計算出在相同 MTBF 下不同 β 值下之 θ 值，並計算出不同 $\lambda_2(t)$ 。

$\beta=0.5$

$$\lambda_2(t) = 1.10 \times 10^{-2} t^{-0.5} \quad (5-2b)$$

$\beta=1.5$

$$\lambda_2(t) = 4.78 \times 10^{-6} t^{0.5} \quad (5-2c)$$



$\beta=2$

$$\lambda_2(t) = 9.05 \times 10^{-8} t$$

$\beta=4$ 時

$$\lambda_2(t) = 8.96 \times 10^{-15} t^3$$

(5-2e)

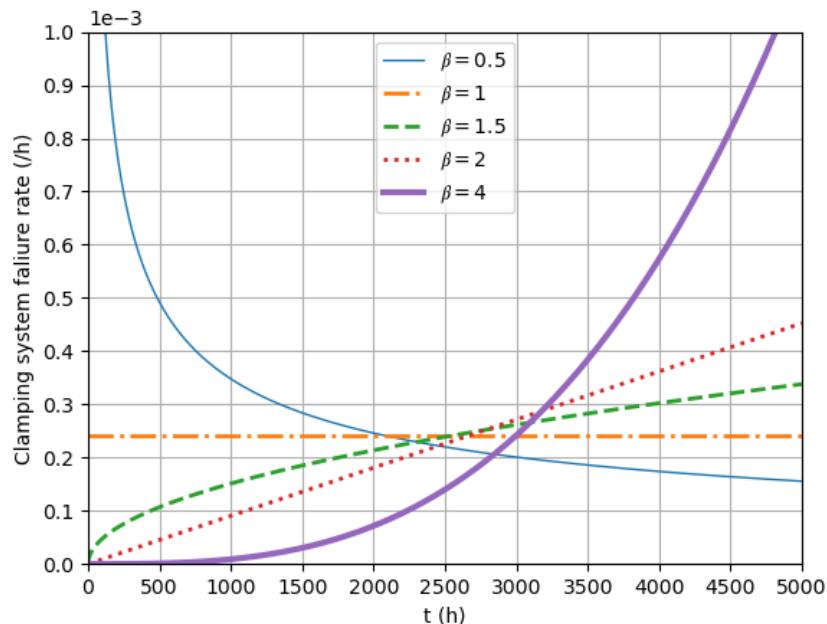


圖 5-4 鎮模子系統 $\lambda(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

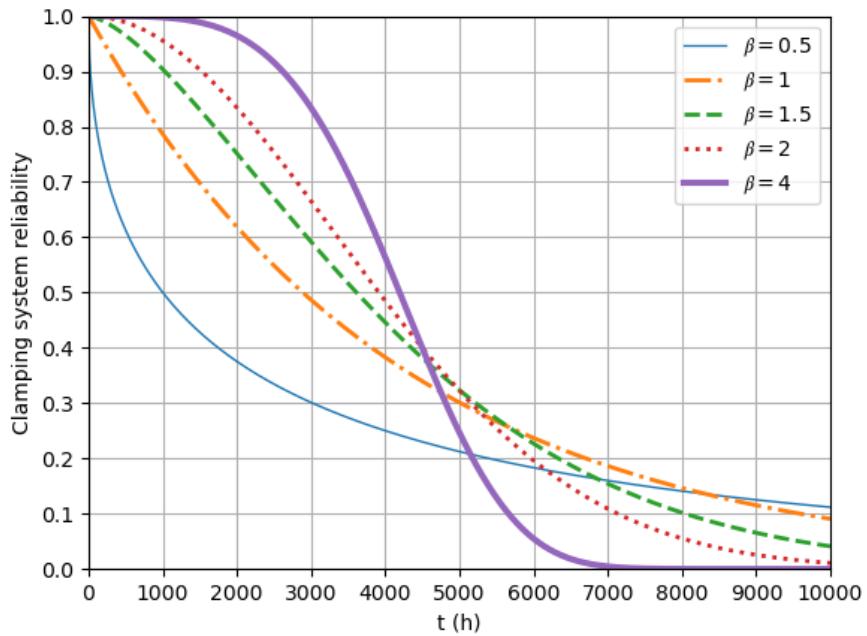


圖 5-5 鎖模子系統 $R(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

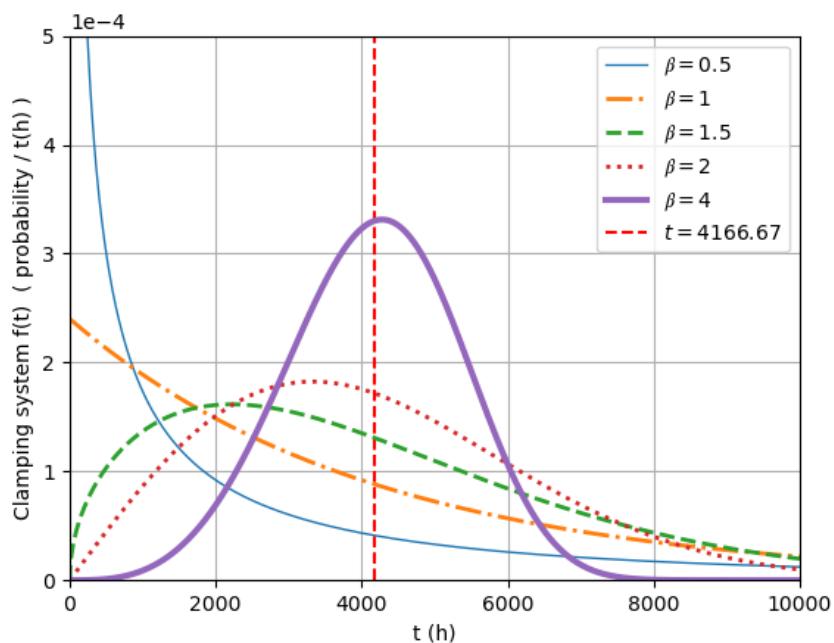


圖 5-6 鎖模子系統 $f(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

5.1.3 電子子系統

透過 4.3.1 小節可知電子子系統經分配過後可得

$$\lambda_3(t) = 0.00026 \quad (5-3a)$$



此時相當於 $\beta=1$ ，故障率為一定值，透過式(3-21)我們可計算出在相同 MTBF 下不同 β 值下之 θ 值，並計算出不同 $\lambda_3(t)$ 。

$\beta=0.5$

$$\lambda_3(t) = 1.14 \times 10^{-2} t^{-0.5} \quad (5-3b)$$

$\beta=1.5$

$$\lambda_3(t) = 5.40 \times 10^{-6} t^{0.5} \quad (5-3c)$$

$\beta=2$

$$\lambda_3(t) = 1.06 \times 10^{-7} t \quad (5-3d)$$

$\beta=4$

$$\lambda_3(t) = 1.23 \times 10^{-14} t^3 \quad (5-3e)$$

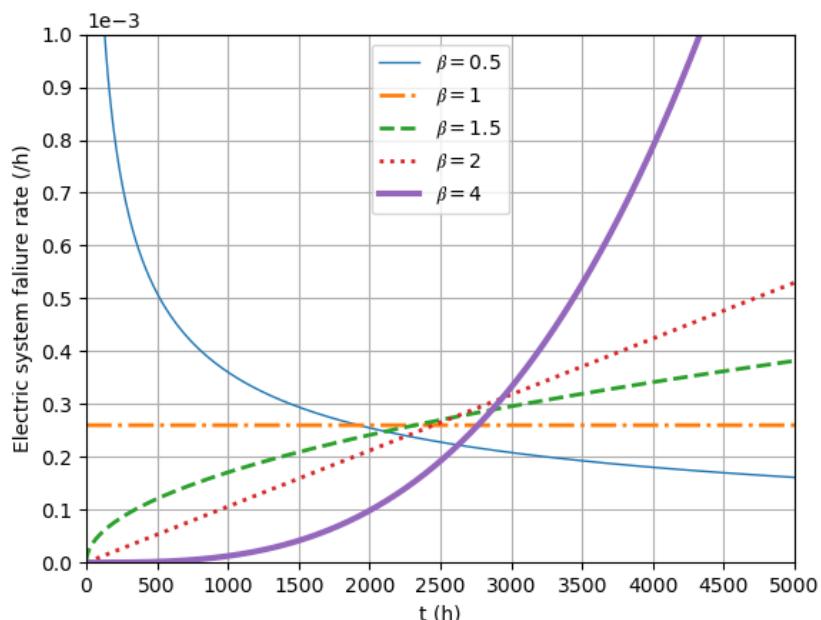


圖 5-7 電子子系統 $\lambda(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

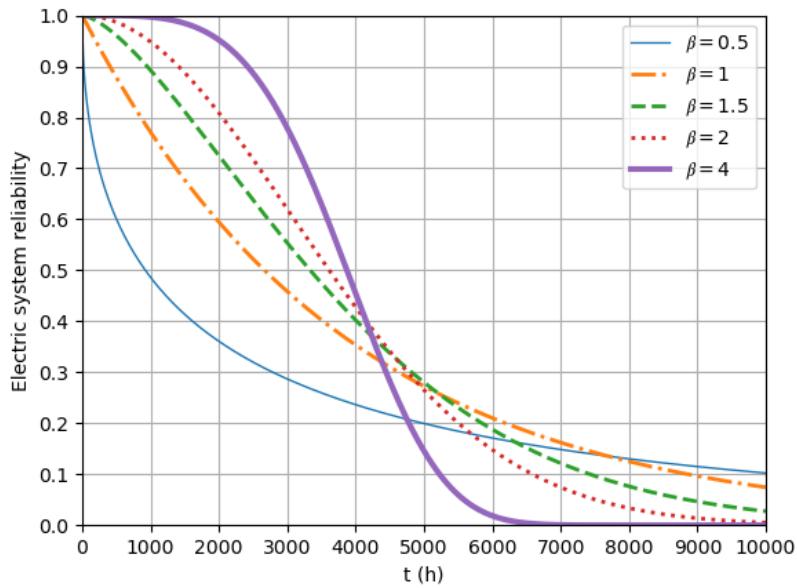


圖 5-8 電子子系統 $R(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

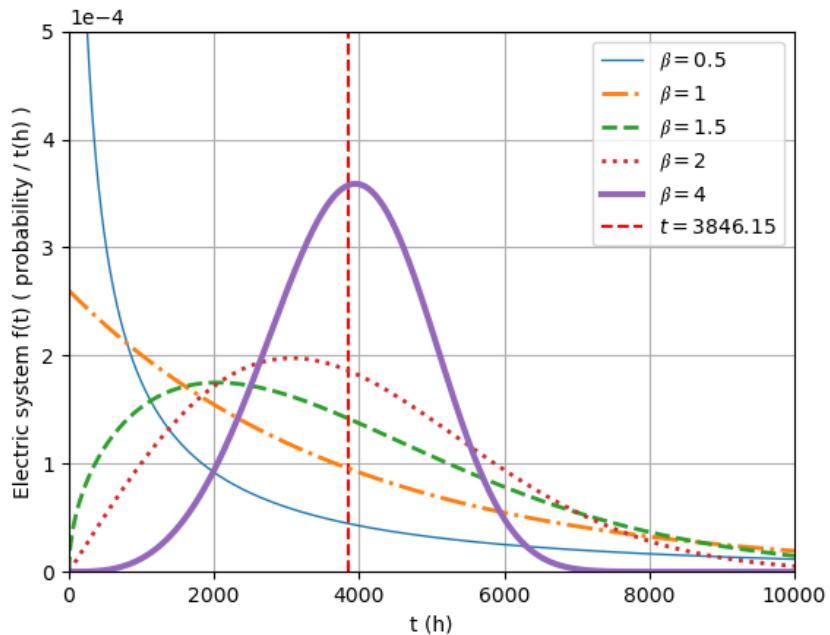


圖 5-9 電子子系統 $f(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

5.1.4 主傳動子系統

透過 4.3.1 小節可知主傳動子系統經分配過後可得

$$\lambda_4(t) = 0.00027 \quad (5-4a)$$



此時相當於 $\beta=1$ ，故障率為一定值，透過式(3-21)我們可計算出在相同 MTBF 下不同 β 值下之 θ 值，並計算出不同 $\lambda_4(t)$ 。

$\beta=0.5$

$$\lambda_4(t) = 1.16 \times 10^{-2} t^{-0.5} \quad (5-4b)$$

$\beta=1.5$

$$\lambda_4(t) = 5.71 \times 10^{-6} t^{0.5} \quad (5-4c)$$

$\beta=2$

$$\lambda_4(t) = 1.15 \times 10^{-7} t \quad (5-4d)$$

$\beta=4$ 時

$$\lambda_4(t) = 1.43 \times 10^{-14} t^3 \quad (5-4e)$$

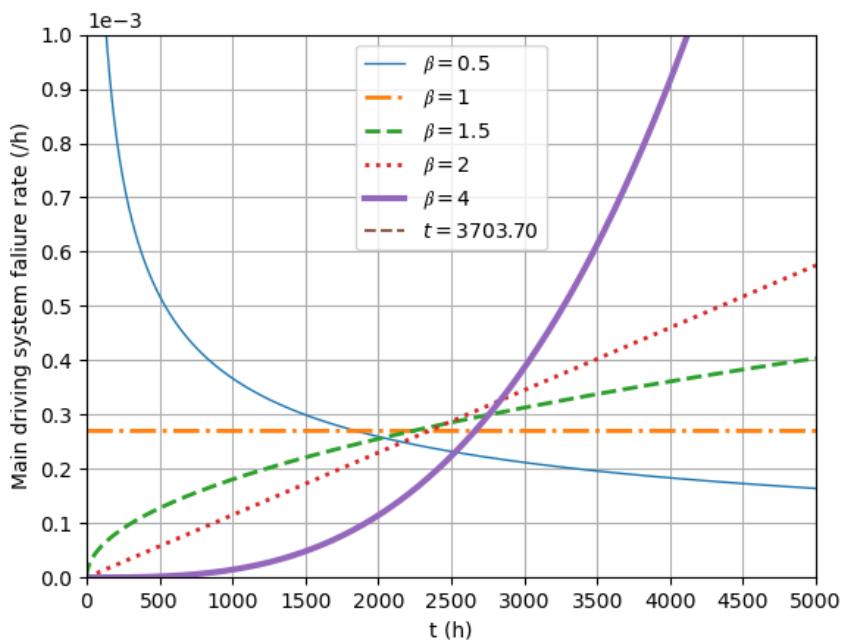


圖 5-10 主傳動子系統 $\lambda(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

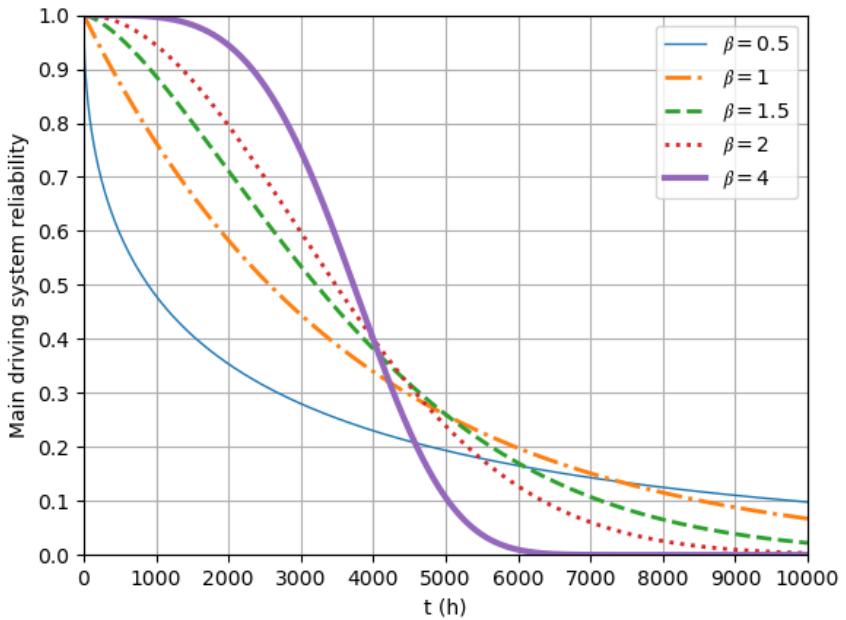


圖 5-11 主傳動子系統 $R(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

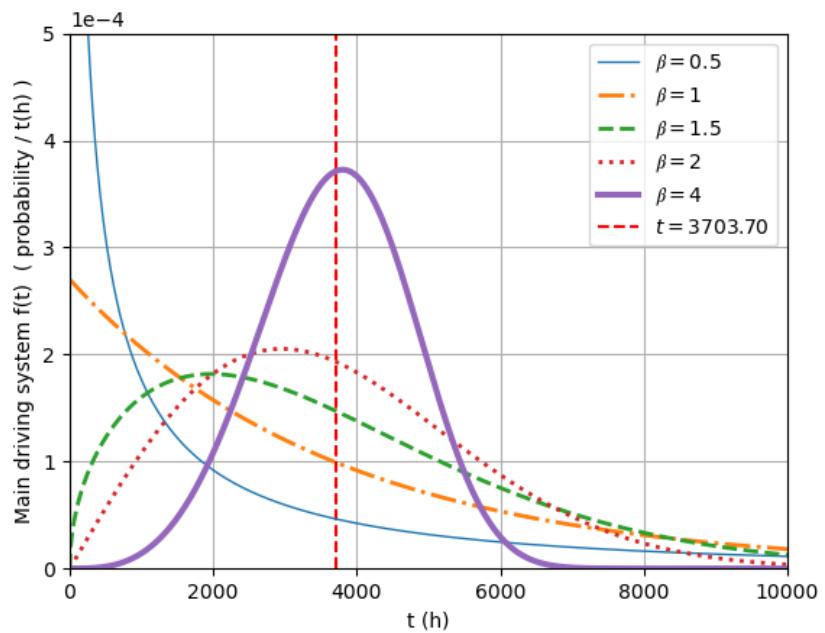


圖 5-12 主傳動子系統 $f(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)



5.1.5 進給子系統

透過 4.3.1 小節可知進給子系統經分配過後可得

$$\lambda_5(t) = 0.00027$$

此時相當於 $\beta=1$ ，故障率為一定值，透過式(3-21)我們可計算出在相同 MTBF 下不同 β 值下之 θ 值，並計算出不同 $\lambda_5(t)$ 。

$\beta=0.5$

$$\lambda_5(t) = 1.16 \times 10^{-2} t^{-0.5} \quad (5-5b)$$

$\beta=1.5$

$$\lambda_5(t) = 5.71 \times 10^{-6} t^{0.5} \quad (5-5c)$$

$\beta=2$

$$\lambda_5(t) = 1.15 \times 10^{-7} t \quad (5-5d)$$

$\beta=4$ 時

$$\lambda_5(t) = 1.43 \times 10^{-14} t^3 \quad (5-5e)$$

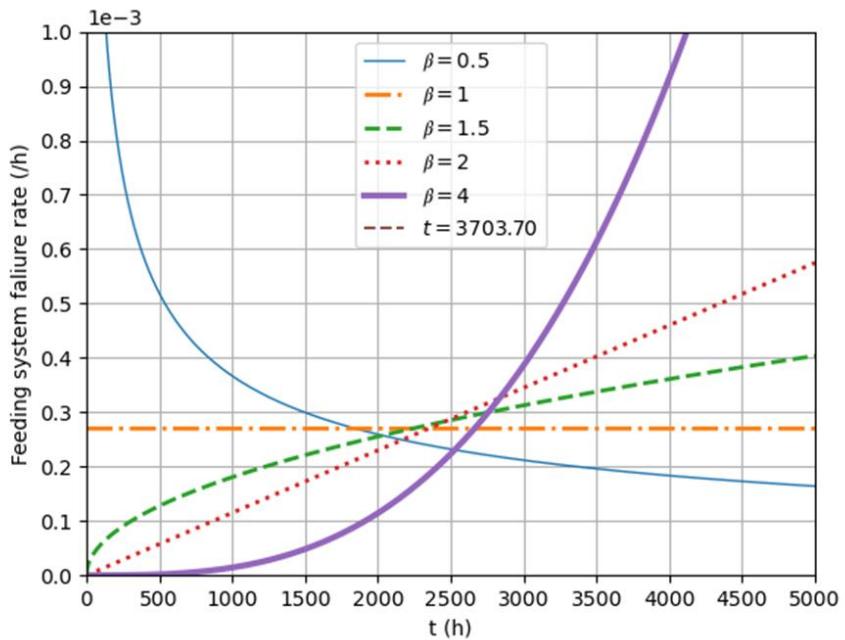


圖 5-13 進給子系統 $\lambda(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

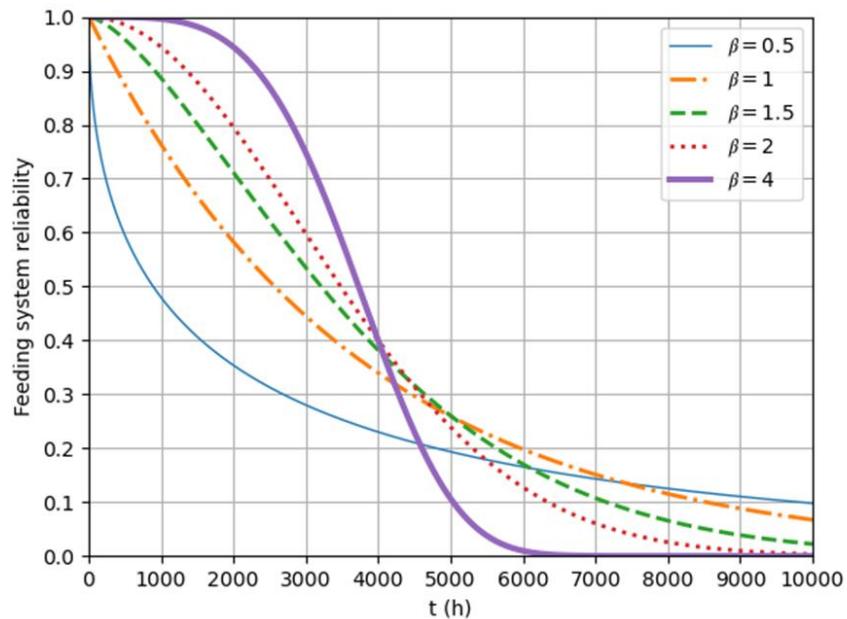


圖 5-14 進給子系統 $R(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

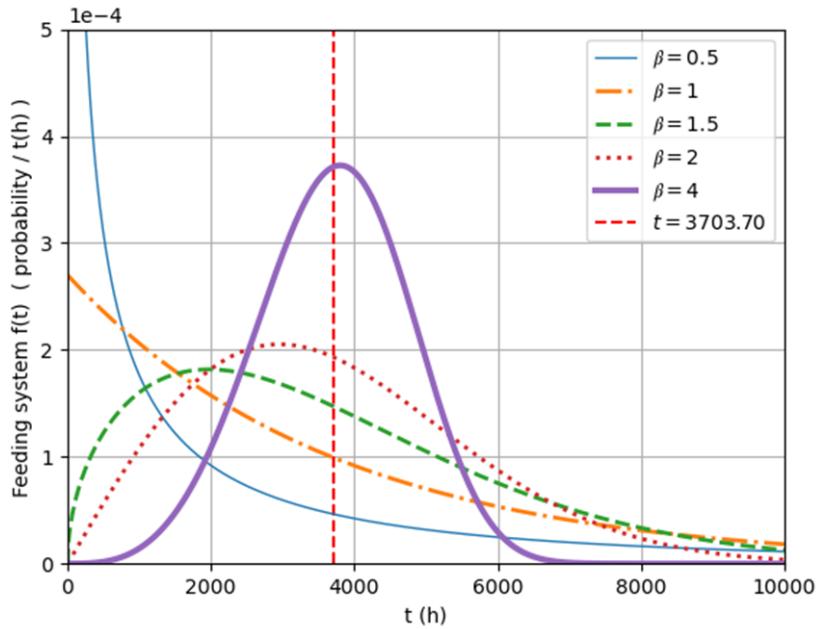
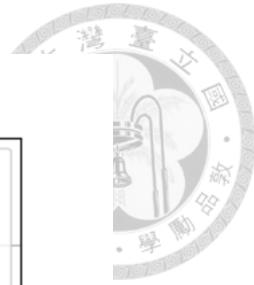


圖 5-15 進給子系統 $f(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

5.1.6 液壓子系統

透過 4.3.1 小節可知液壓子系統經分配過後可得

$$\lambda_6(t) = 0.00026 \quad (5-6a)$$

此時相當於 $\beta=1$ ，故障率為一定值，透過式(3-21)我們可計算出在相同 MTBF 下不同 β 值下之 θ 值，並計算出不同 $\lambda_6(t)$ 。

$\beta=0.5$

$$\lambda_6(t) = 1.14 \times 10^{-2} t^{-0.5} \quad (5-6b)$$

$\beta=1.5$

$$\lambda_6(t) = 5.40 \times 10^{-6} t^{0.5} \quad (5-6c)$$

$\beta=2$

$$\lambda_6(t) = 1.06 \times 10^{-7} t \quad (5-6d)$$

$\beta=4$

$$\lambda_6(t) = 1.23 \times 10^{-14} t^3$$

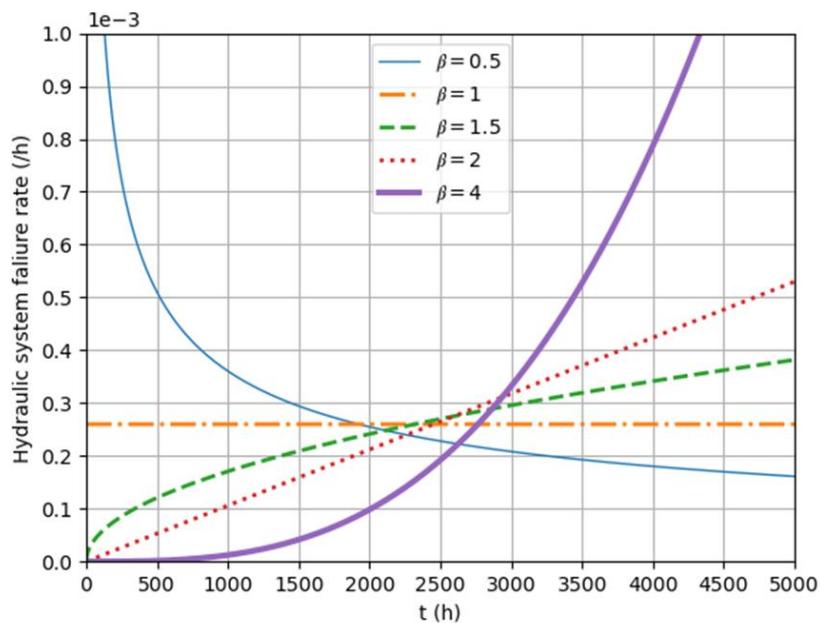


圖 5-16 液壓子系統 $\lambda(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

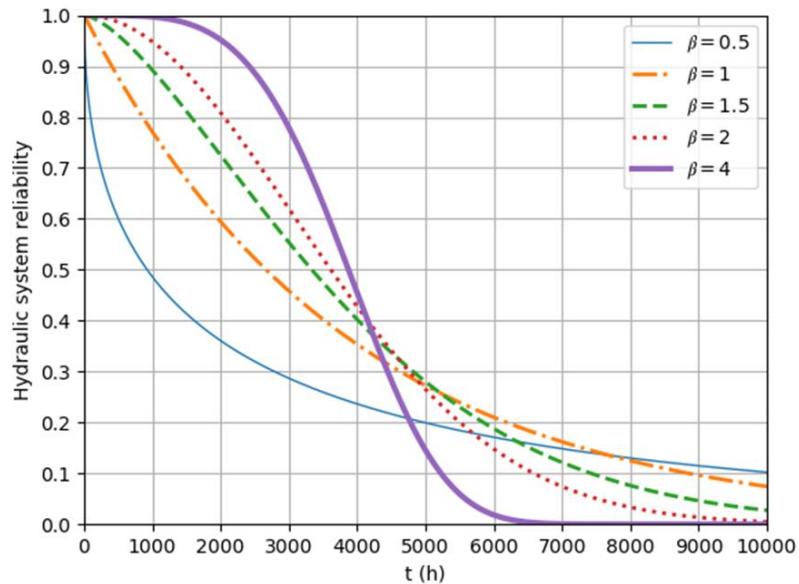


圖 5-17 液壓子系統 $R(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

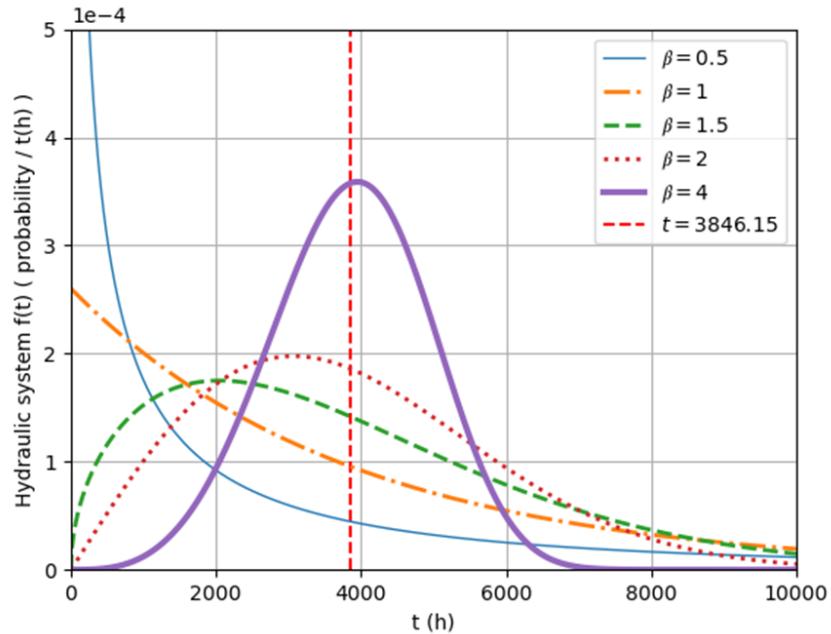


圖 5-18 液壓子系統 $f(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

5.1.7 冷卻子系統

透過 4.3.1 小節可知冷卻子系統經分配過後可得

$$\lambda_7(t) = 0.00025 \quad (5-7a)$$

此時相當於 $\beta=1$ ，故障率為一定值，透過式(3-21)我們可計算出在相同 MTBF 下不同 β 值下之 θ 值，並計算出不同 $\lambda_7(t)$ 。

$\beta=0.5$ 時

$$\lambda_7(t) = 1.12 \cdot 10^{-2} t^{-0.5} \quad (5-7b)$$

$\beta=1.5$ 時

$$\lambda_7(t) = 5.09 \cdot 10^{-6} t^{0.5} \quad (5-7c)$$

$\beta=2$ 時

$$\lambda_7(t) = 9.82 \cdot 10^{-8} t \quad (5-7d)$$

$\beta=4$ 時

$$\lambda_7(t) = 1.05 \times 10^{-14} t^3$$

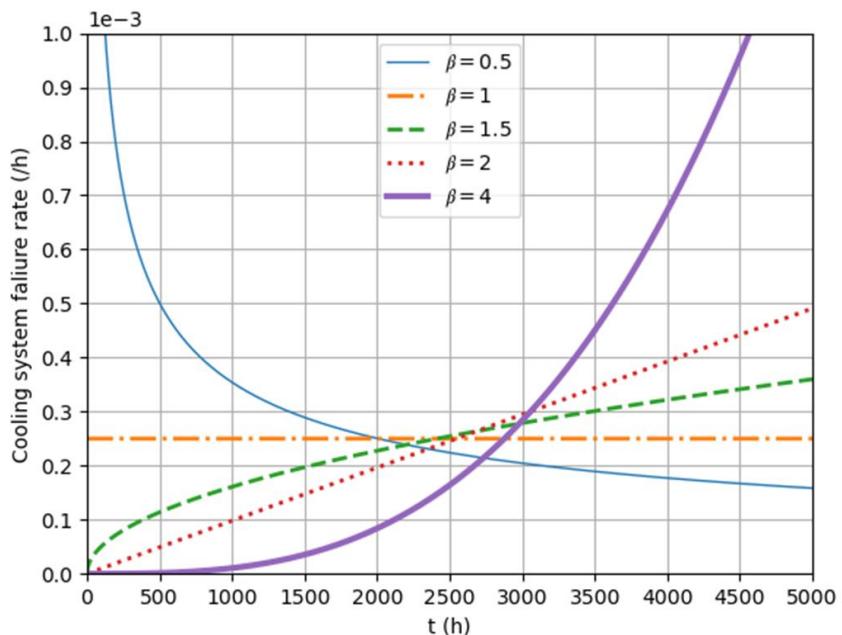


圖 5-19 冷卻子系統 $\lambda(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

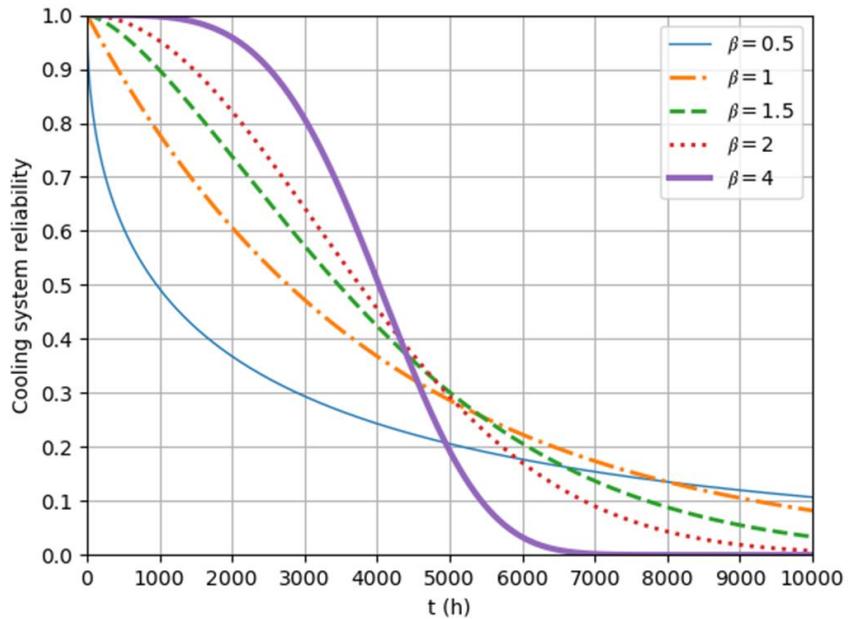


圖 5-20 冷卻子系統 $R(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

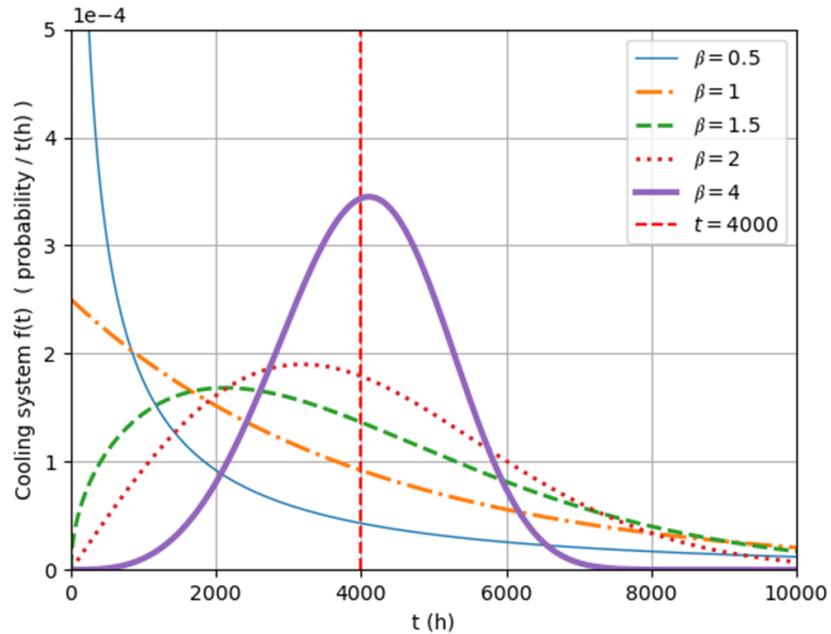
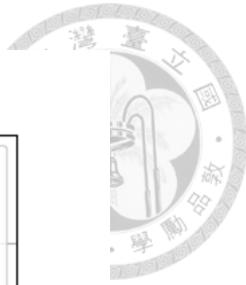


圖 5-21 冷卻子系統 $f(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

5.1.8 防護子系統

透過 4.3.1 小節可知防護子系統經分配過後可得

$$\lambda_8(t) = 0.00024 \quad (5-8a)$$

此時相當於 $\beta=1$ ，故障率為一定值，透過式(3-21)我們可計算出在相同 MTBF 下不同 β 值下之 θ 值，並計算出不同 $\lambda_8(t)$ 。

$\beta=0.5$

$$\lambda_8(t) = 1.10 * 10^{-2} t^{-0.5} \quad (5-8b)$$

$\beta=1.5$

$$\lambda_8(t) = 4.78 * 10^{-6} t^{0.5} \quad (5-8c)$$

$\beta=2$

$$\lambda_8(t) = 9.05 * 10^{-8} t \quad (5-8d)$$

$\beta=4$ 時

$$\lambda_8(t) = 8.96 \times 10^{-15} t^3$$

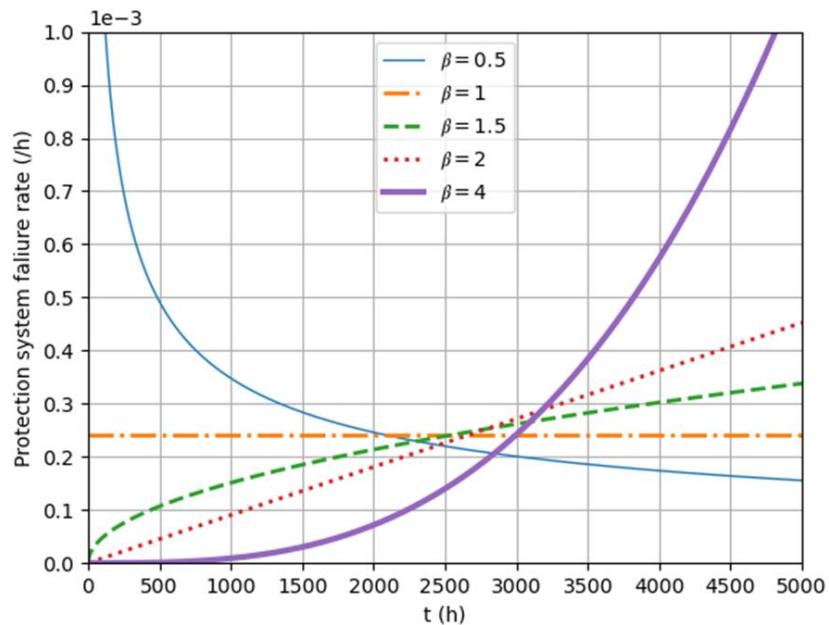


圖 5-22 防護子系統 $\lambda(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

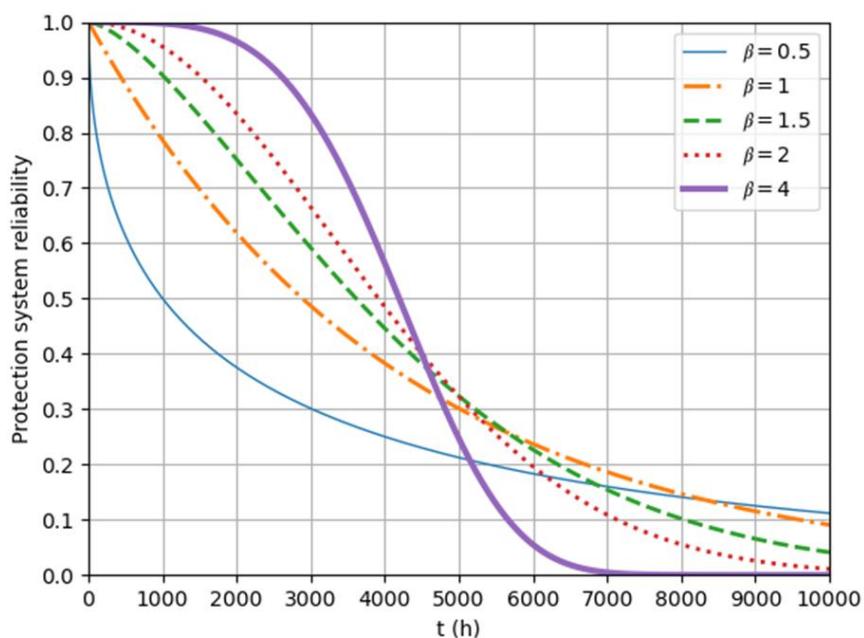


圖 5-23 防護子系統 $R(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

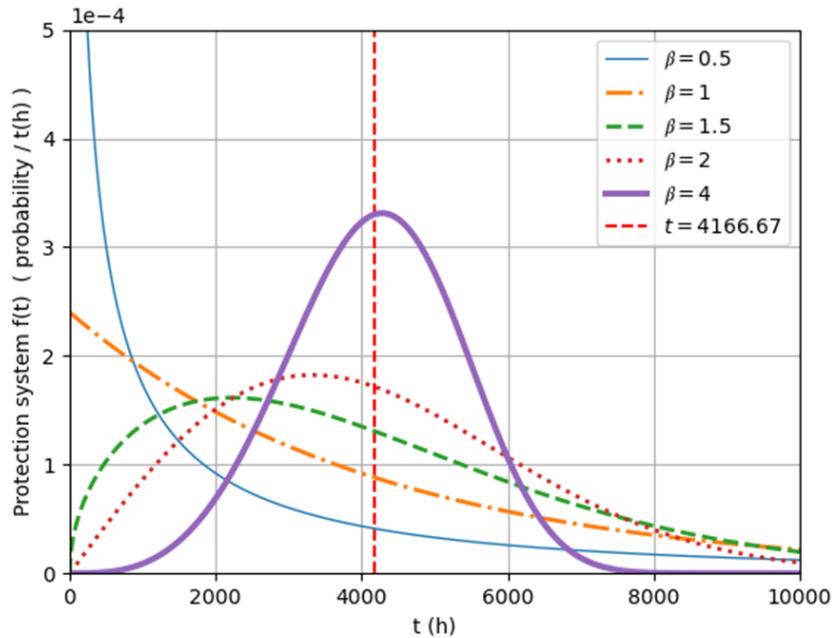


圖 5-24 防護子系統 $f(t)$ 圖 (MTBF = 500 h)

5.2 子系統可靠度分析(MTBF = 1300 h)

本節將透過符合韋伯分佈基本的可靠度運算來進行各子系統在總系統 MTBF = 1300 h 時之可靠度分析。

5.2.1 刀塔子系統

透過 4.3.2 小節可知刀塔子系統經分配過後可得

$$\lambda_1(t) = 0.000087 \quad (5-9a)$$

此時相當於 $\beta=1$ ，故障率為一定值，透過式(3-21)我們可計算出在相同 MTBF 下不同 β 值下之 θ 值，並計算出不同 $\lambda_1(t)$ 。

$\beta=0.5$

$$\lambda_1(t) = 6.60 \times 10^{-3} t^{-0.5} \quad (5-9b)$$

$\beta=1.5$

$$\lambda_1(t) = 1.05 \times 10^{-6} t^{0.5} \quad (5-9c)$$



$\beta=2$

$$\lambda_1(t) = 1.19 \times 10^{-8} t$$

$\beta=4$

$$\lambda_1(t) = 1.55 \times 10^{-16} t^3 \quad (5-9e)$$

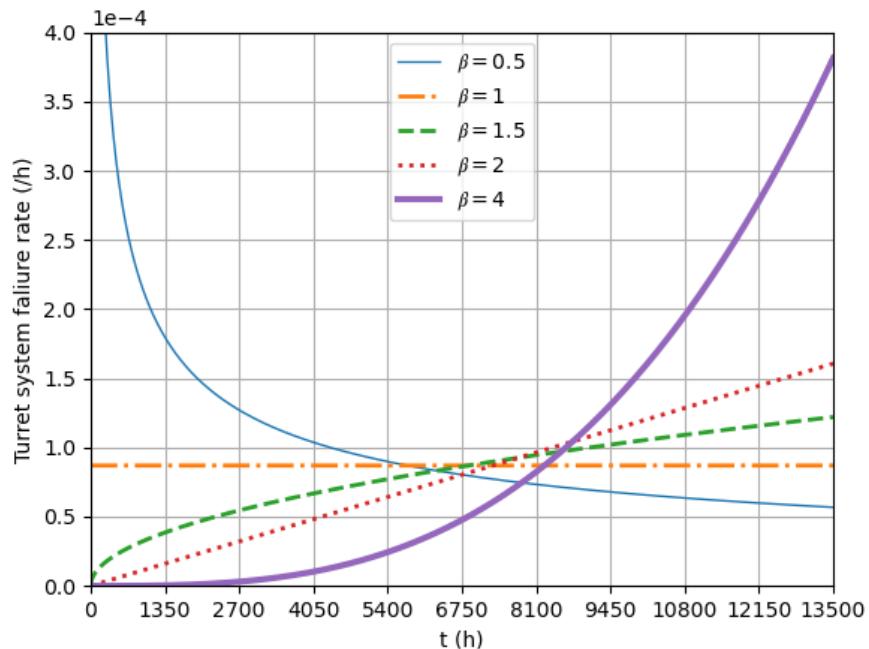


圖 5-25 刀塔子系統 $\lambda(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

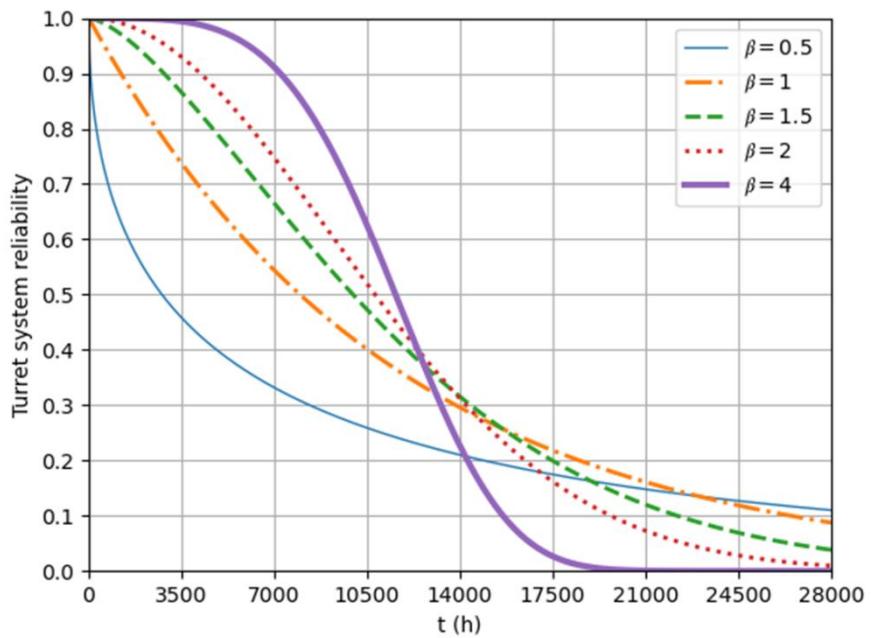


圖 5-26 刀塔子系統 $R(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

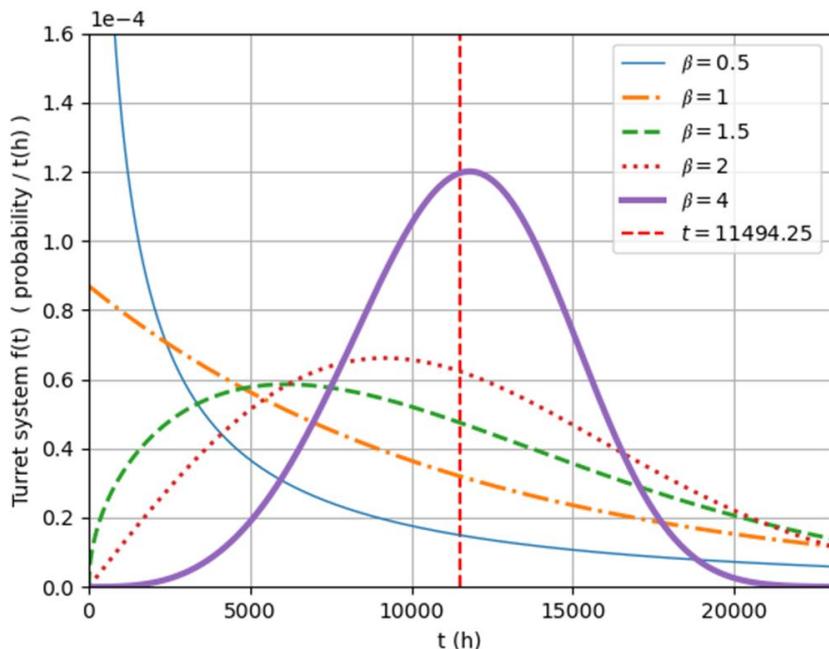


圖 5-27 刀塔子系統 $f(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)



5.2.2 鎖模子系統

透過 4.3.2 小節可知鎖模子系統經分配過後可得

$$\lambda_2(t) = 0.000092$$

(5-10a)

此時相當於 $\beta=1$ ，故障率為一定值，透過式(3-21)我們可計算出在相同 MTBF 下不同 β 值下之 θ 值，並計算出不同 $\lambda_2(t)$ 。

$\beta=0.5$ 時

$$\lambda_2(t) = 6.78*10^{-3}t^{-0.5} \quad (5-10b)$$

$\beta=1.5$ 時

$$\lambda_2(t) = 1.14*10^{-6}t^{0.5} \quad (5-10c)$$

$\beta=2$ 時

$$\lambda_2(t) = 1.33*10^{-8}t \quad (5-10d)$$

$\beta=4$ 時

$$\lambda_2(t) = 1.93*10^{-16}t^3 \quad (5-10e)$$

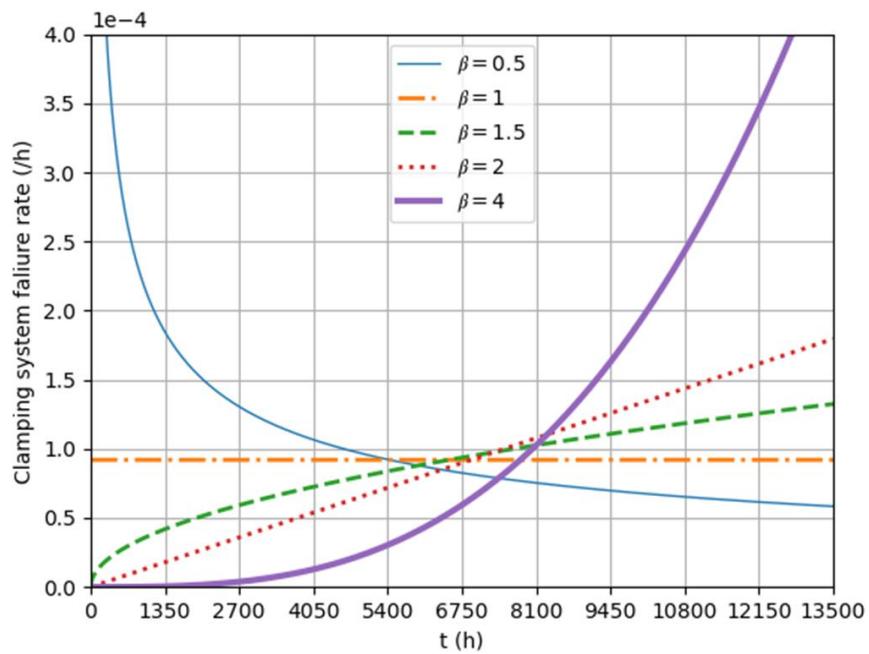


圖 5-28 鎖模子系統 $\lambda(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

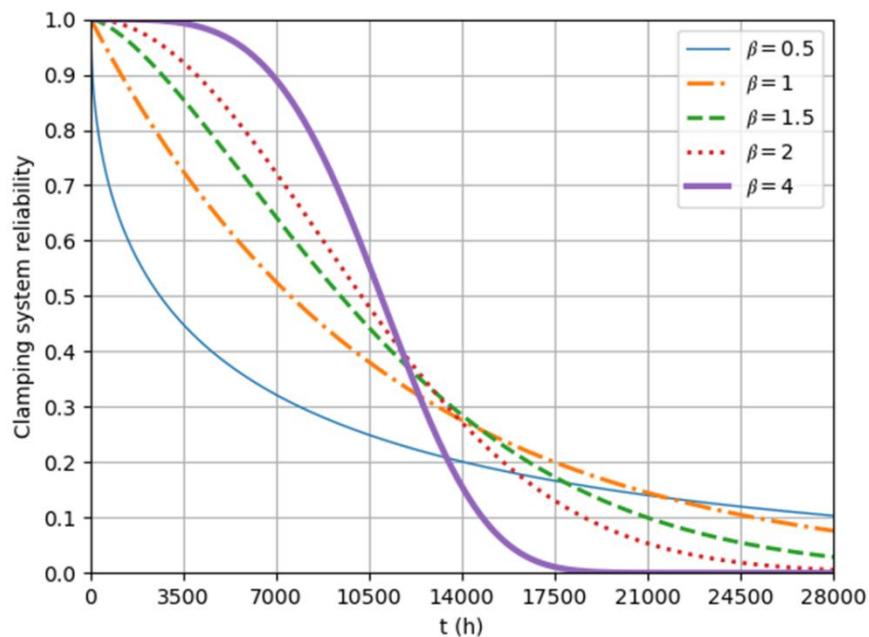


圖 5-29 鎖模子系統 $R(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

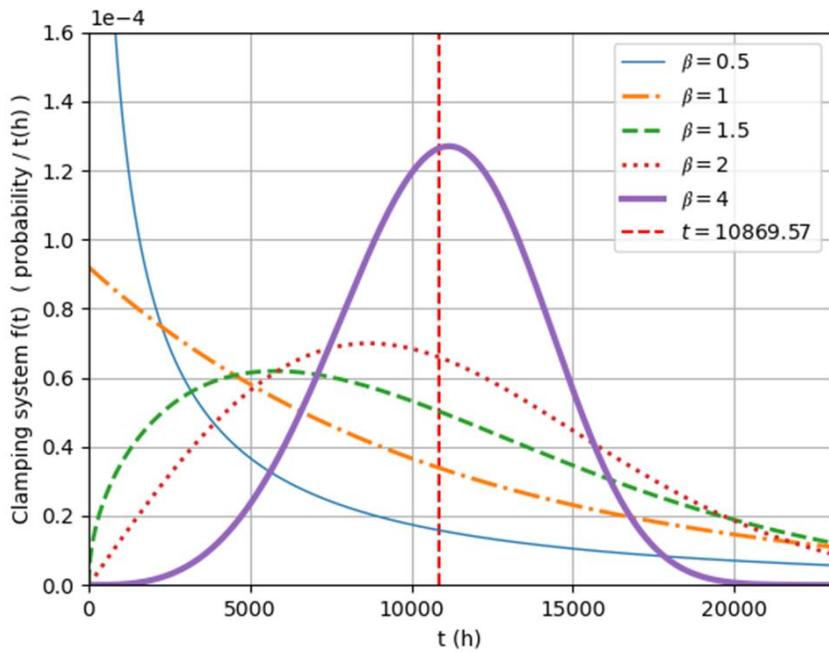


圖 5-30 鎖模子系統 $f(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

5.2.3 電子子系統

透過 4.3.2 小節可知電子子系統經分配過後可得

$$\lambda_3(t) = 0.0001 \quad (5-11a)$$

此時相當於 $\beta=1$ ，故障率為一定值，透過式(3-21)我們可計算出在相同 MTBF 下不同 β 值下之 θ 值，並計算出不同 $\lambda_3(t)$ 。

$\beta=0.5$ 時

$$\lambda_3(t) = 7.07 \times 10^{-3} t^{-0.5} \quad (5-11b)$$

$\beta=1.5$ 時

$$\lambda_3(t) = 1.29 \times 10^{-6} t^{0.5} \quad (5-11c)$$

$\beta=2$ 時

$$\lambda_3(t) = 1.57 \times 10^{-8} t \quad (5-11d)$$

$\beta = 4$ 時

$$\lambda_3(t) = 2.70 \times 10^{-16} t^3$$

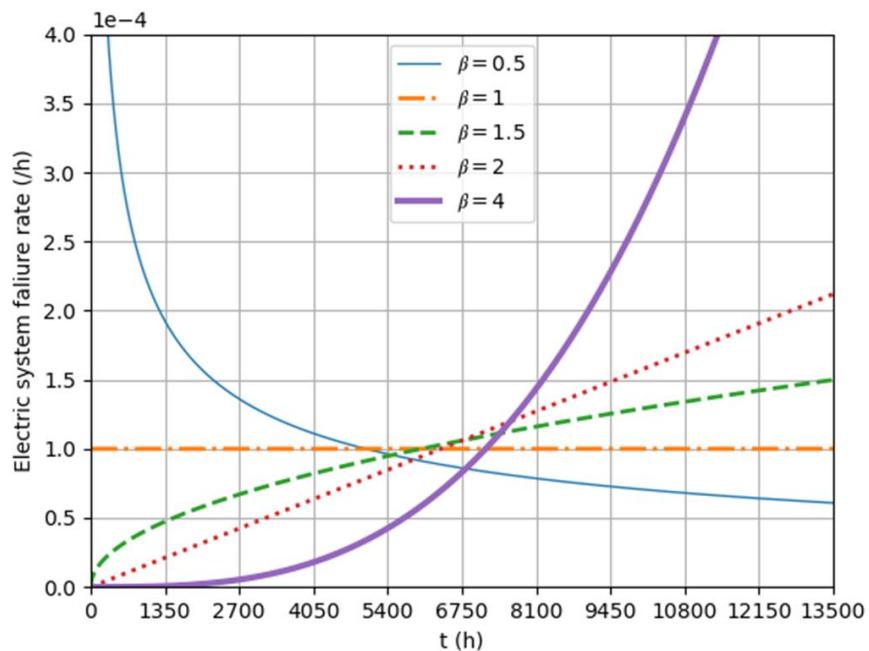


圖 5-31 電子子系統 $\lambda(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

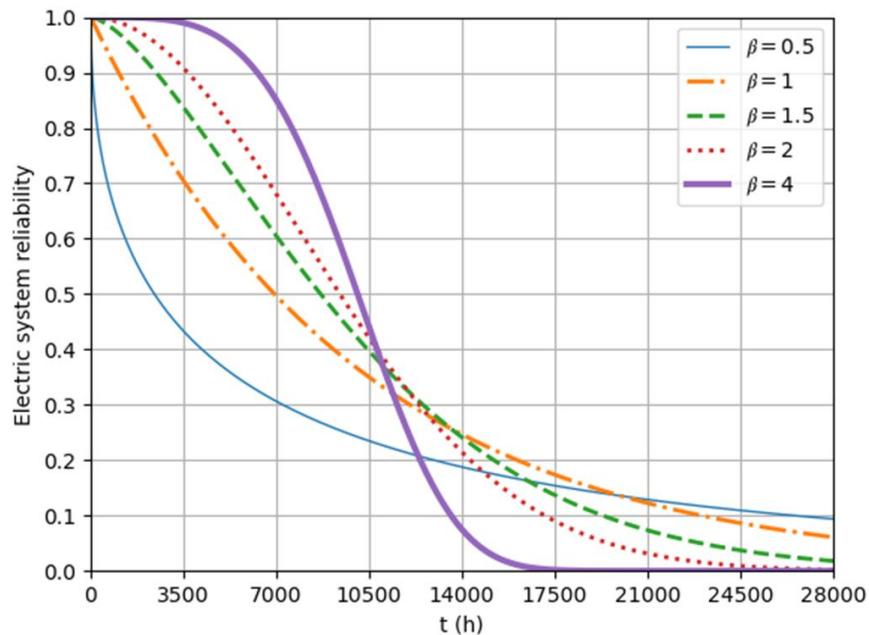


圖 5-32 電子子系統 $R(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

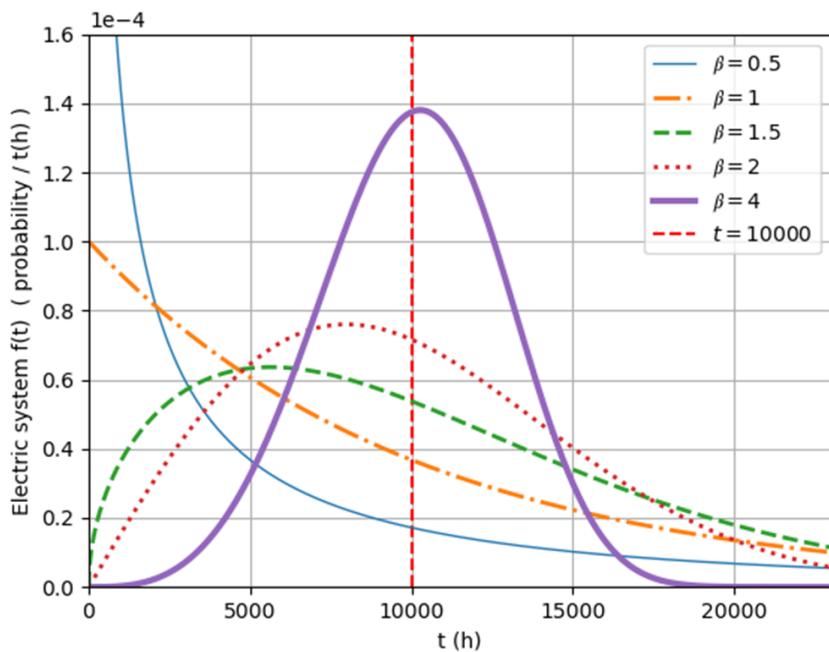


圖 5-33 電子子系統 $f(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

5.2.4 主傳動子系統

透過 4.3.2 小節可知主傳動子系統經分配過後可得

$$\lambda_4(t) = 0.000104 \quad (5-12a)$$

此時相當於 $\beta=1$ ，故障率為一定值，透過式(3-21)我們可計算出在相同 MTBF 下不同 β 值下之 θ 值，並計算出不同 $\lambda_4(t)$ 。

$\beta=0.5$ 時

$$\lambda_4(t) = 7.21 \times 10^{-3} t^{-0.5} \quad (5-12b)$$

$\beta=1.5$ 時

$$\lambda_4(t) = 1.37 \times 10^{-6} t^{0.5} \quad (5-12c)$$

$\beta=2$ 時

$$\lambda_4(t) = 1.70 \times 10^{-8} t \quad (5-12d)$$

$\beta = 4$ 時

$$\lambda_4(t) = 3.16 \times 10^{-16} t^3$$

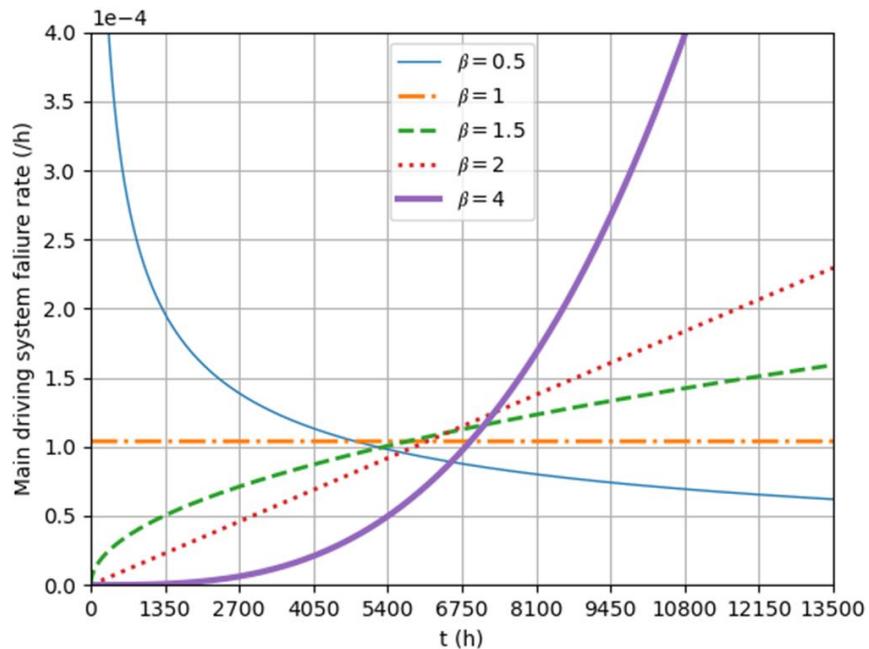


圖 5-34 主傳動子系統 $\lambda(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

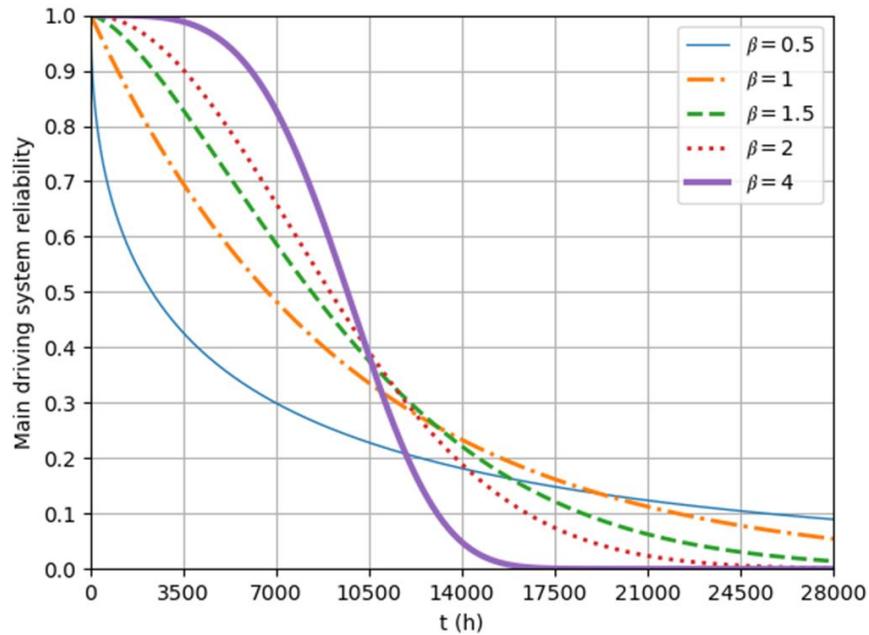


圖 5-35 主傳動子系統 $R(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

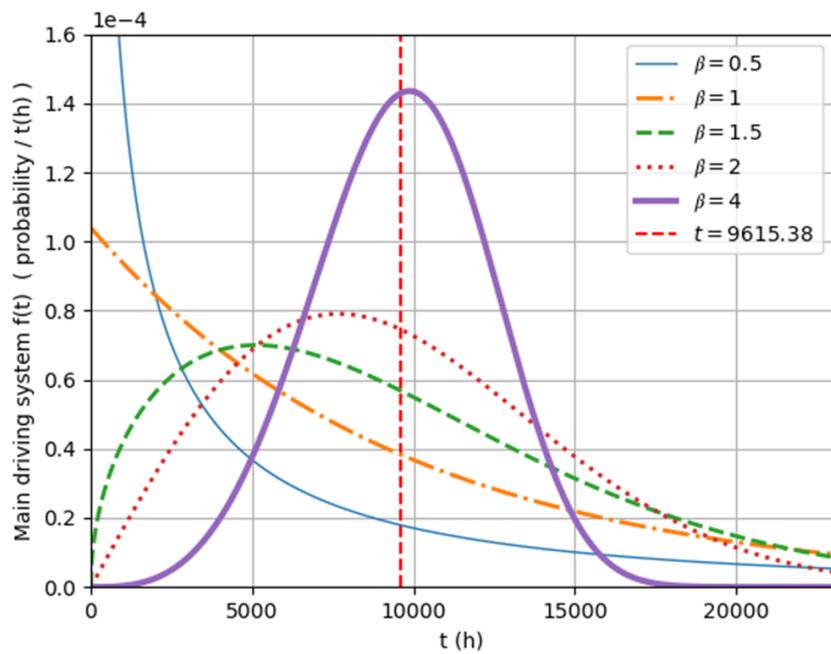


圖 5-36 主傳動子系統 $f(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

5.2.5 進給子系統

透過 4.3.2 小節可知進給子系統經分配過後可得

$$\lambda_5(t) = 0.000102 \quad (5-13a)$$

此時相當於 $\beta=1$ ，故障率為一定值，透過式(3-21)我們可計算出在相同 MTBF 下不同 β 值下之 θ 值，並計算出不同 $\lambda_5(t)$ 。

$\beta=0.5$ 時

$$\lambda_5(t) = 7.14 \times 10^{-3} t^{-0.5} \quad (5-13b)$$

$\beta=1.5$ 時

$$\lambda_5(t) = 1.33 \times 10^{-6} t^{0.5} \quad (5-13c)$$

$\beta=2$ 時

$$\lambda_5(t) = 1.63 \times 10^{-8} t \quad (5-13d)$$

$\beta = 4$ 時

$$\lambda_5(t) = 2.92 \times 10^{-16} t^3$$

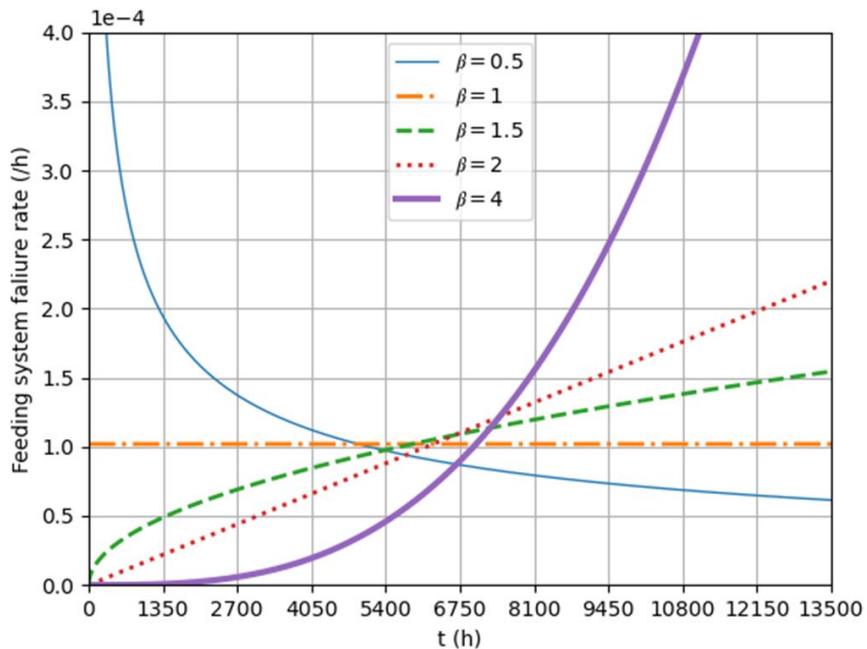


圖 5-37 進給子系統 $\lambda(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

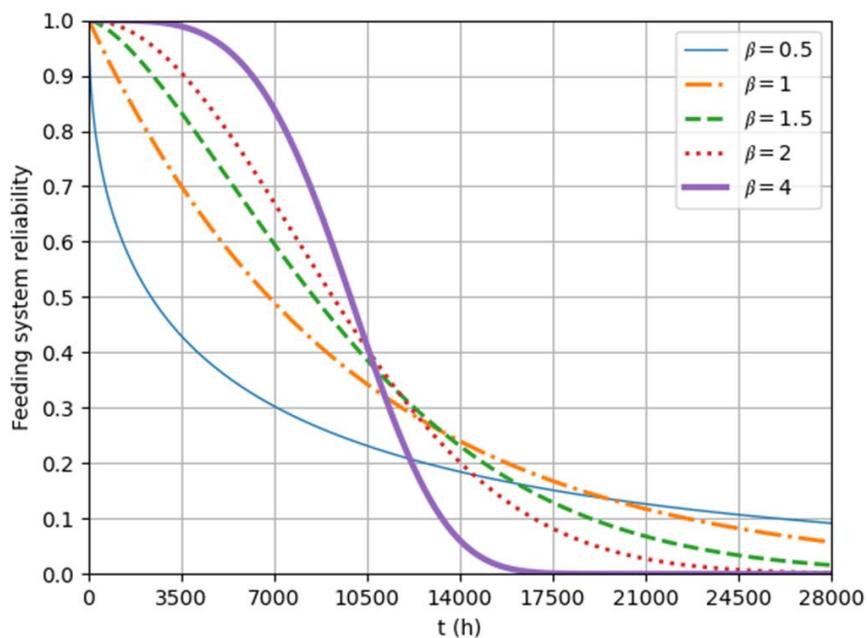


圖 5-38 進給子系統 $R(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

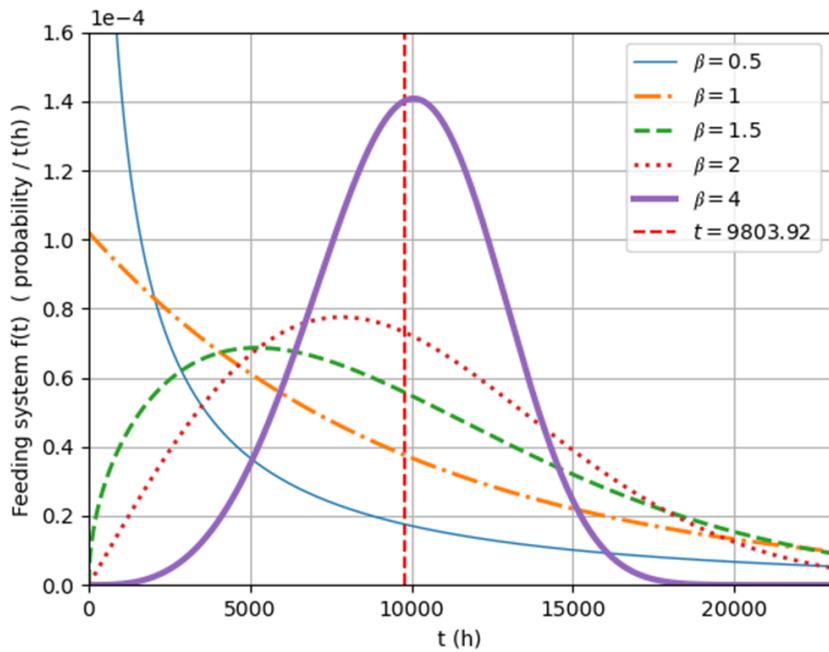


圖 5-39 進給子系統 $f(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

5.2.6 液壓子系統

透過 4.3.2 小節可知液壓子系統經分配過後可得

$$\lambda_6(t) = 0.000098 \quad (5-14a)$$

此時相當於 $\beta=1$ ，故障率為一定值，透過式(3-21)我們可計算出在相同 MTBF 下不同 β 值下之 θ 值，並計算出不同 $\lambda_6(t)$ 。

$\beta=0.5$ 時

$$\lambda_6(t) = 7.06 \times 10^{-3} t^{-0.5} \quad (5-14b)$$

$\beta=1.5$ 時

$$\lambda_6(t) = 1.25 \times 10^{-6} t^{0.5} \quad (5-14c)$$

$\beta=2$ 時

$$\lambda_6(t) = 1.51 \times 10^{-8} t \quad (5-14d)$$

$\beta = 4$ 時

$$\lambda_6(t) = 2.49 \times 10^{-16} t^3$$

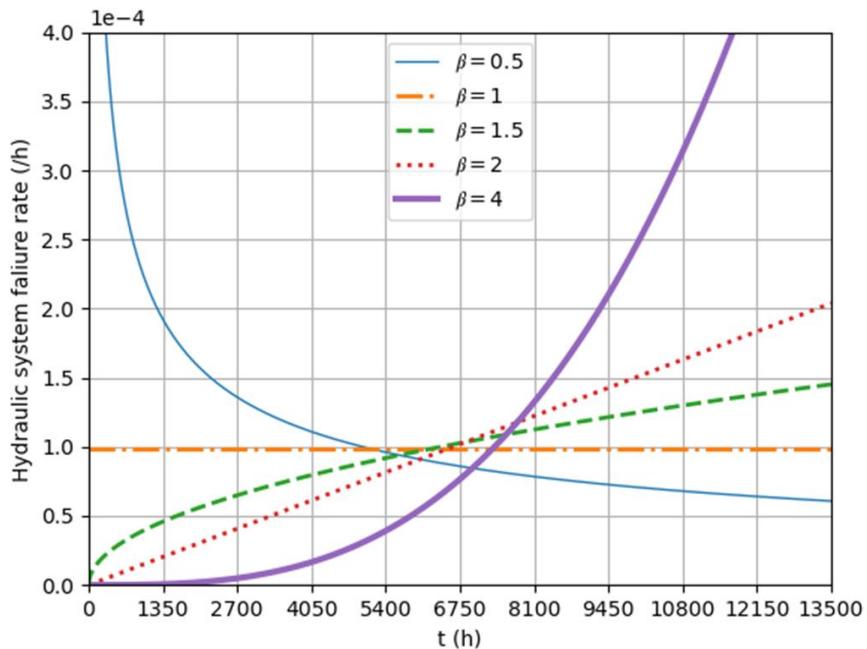


圖 5-40 液壓子系統 $\lambda(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

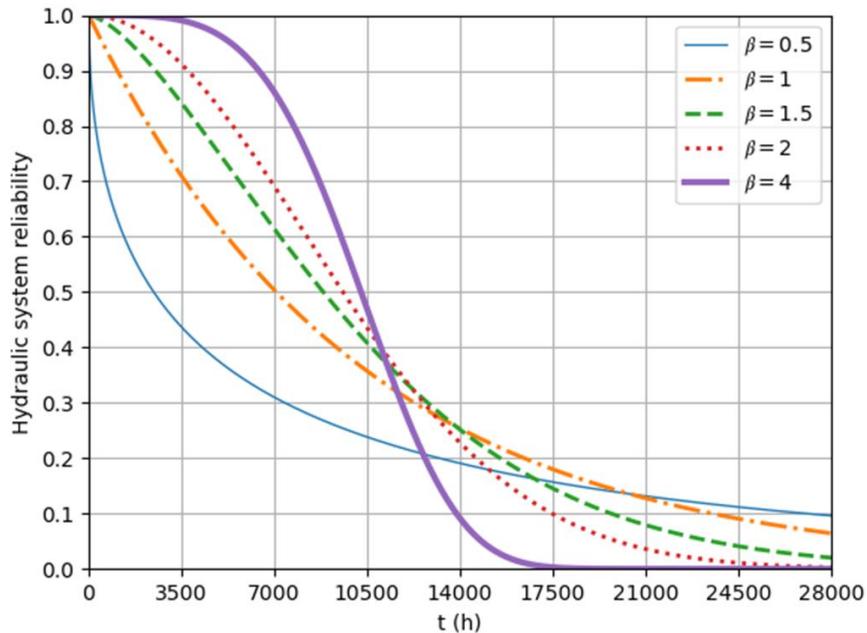


圖 5-41 液壓子系統 $R(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

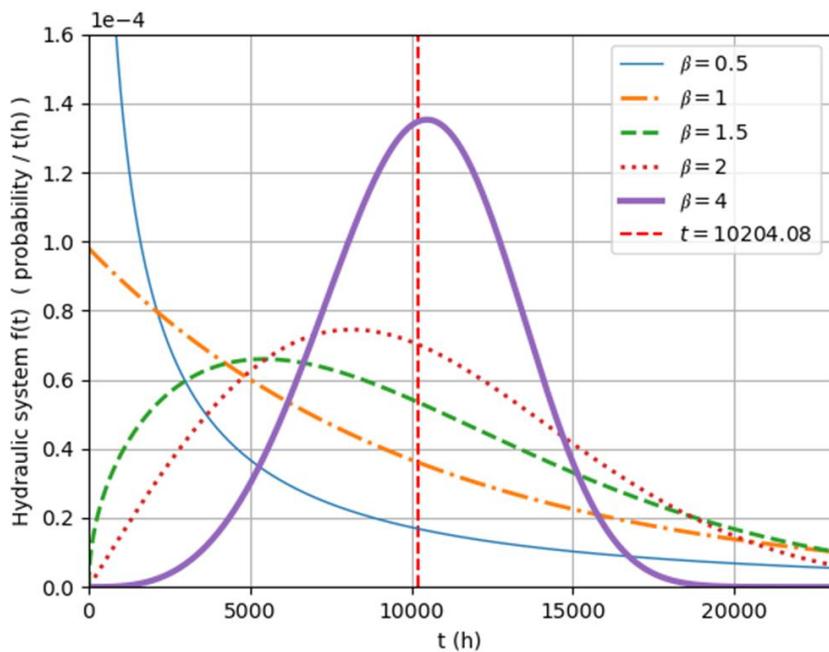


圖 5-42 液壓子系統 $f(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

5.2.7 冷卻子系統

透過 4.3.2 小節可知冷卻子系統經分配過後可得

$$\lambda_7(t) = 0.000096 \quad (5-15a)$$

此時相當於 $\beta=1$ ，故障率為一定值，透過式(3-21)我們可計算出在相同 MTBF 下不同 β 值下之 θ 值，並計算出不同 $\lambda_7(t)$ 。

$\beta=0.5$ 時

$$\lambda_7(t) = 6.93 \times 10^{-3} t^{-0.5} \quad (5-15b)$$

$\beta=1.5$ 時

$$\lambda_7(t) = 1.21 \times 10^{-6} t^{0.5} \quad (5-15c)$$

$\beta=2$ 時

$$\lambda_7(t) = 1.45 \times 10^{-8} t \quad (5-15d)$$

$\beta = 4$ 時

$$\lambda_7(t) = 2.29 \times 10^{-16} t^3$$

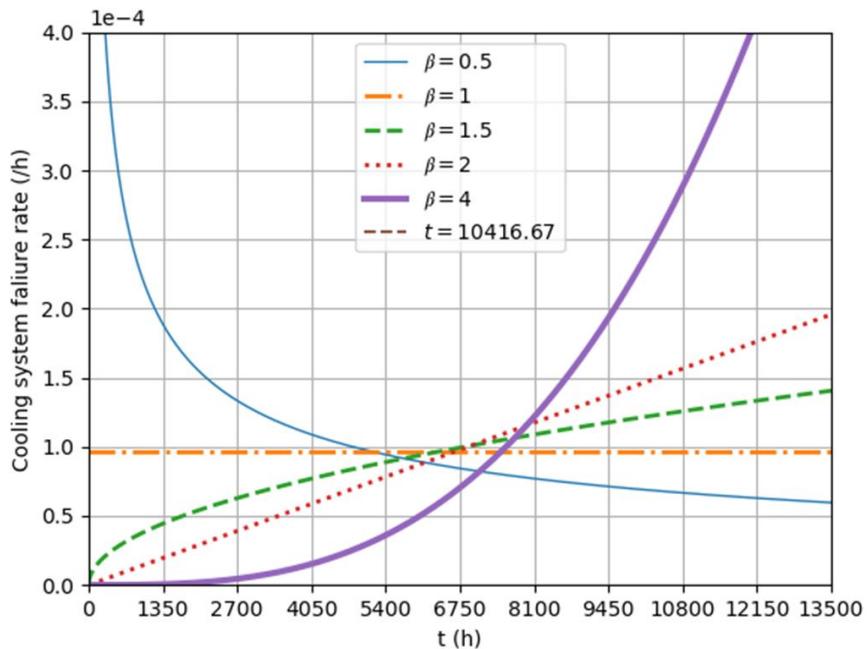


圖 5-43 冷卻子系統 $\lambda(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

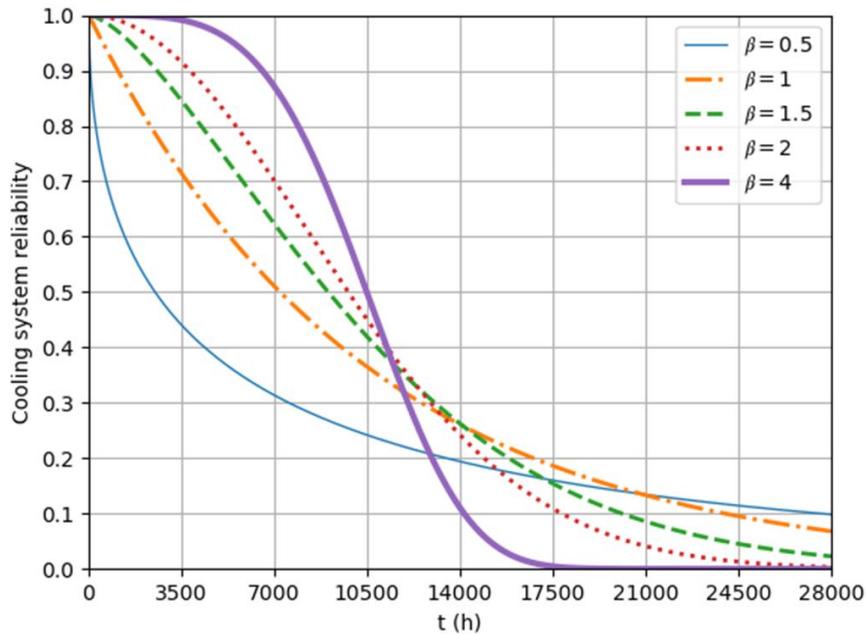


圖 5-44 冷卻子系統 $R(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

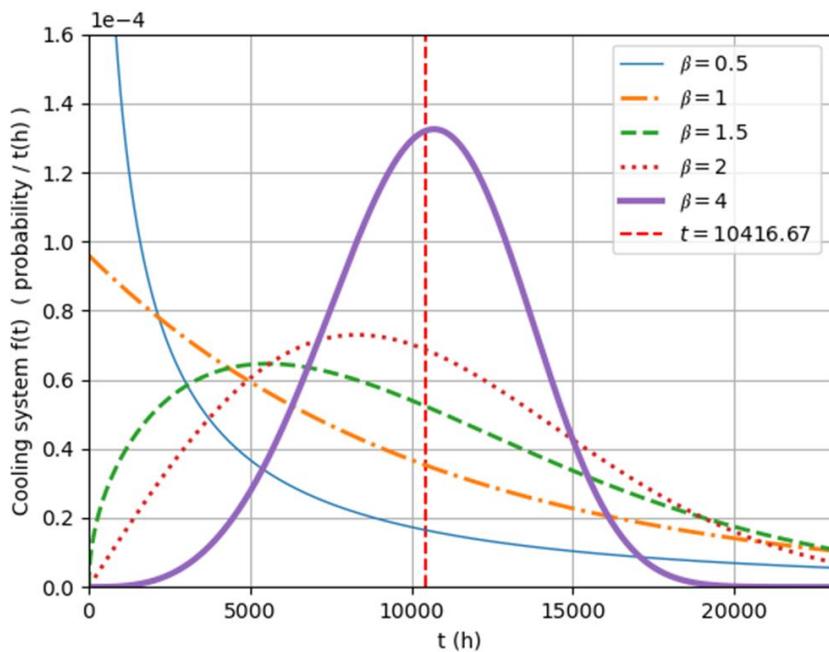


圖 5-45 冷卻子系統 $f(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

5.2.8 防護子系統

透過 4.3.2 小節可知防護子系統經分配過後可得

$$\lambda_8(t) = 0.000090 \quad (5-16a)$$

此時相當於 $\beta=1$ ，故障率為一定值，透過式(3-21)我們可計算出在相同 MTBF 下不同 β 值下之 θ 值，並計算出不同 $\lambda_8(t)$ 。

$\beta=0.5$ 時

$$\lambda_8(t) = 6.71 \times 10^{-3} t^{-0.5} \quad (5-16b)$$

$\beta=1.5$ 時

$$\lambda_8(t) = 1.10 \times 10^{-6} t^{0.5} \quad (5-16c)$$

$\beta=2$ 時

$$\lambda_8(t) = 1.27 \times 10^{-8} t \quad (5-16d)$$

$\beta = 4$ 時

$$\lambda_8(t) = 1.77 \times 10^{-16} t^3$$

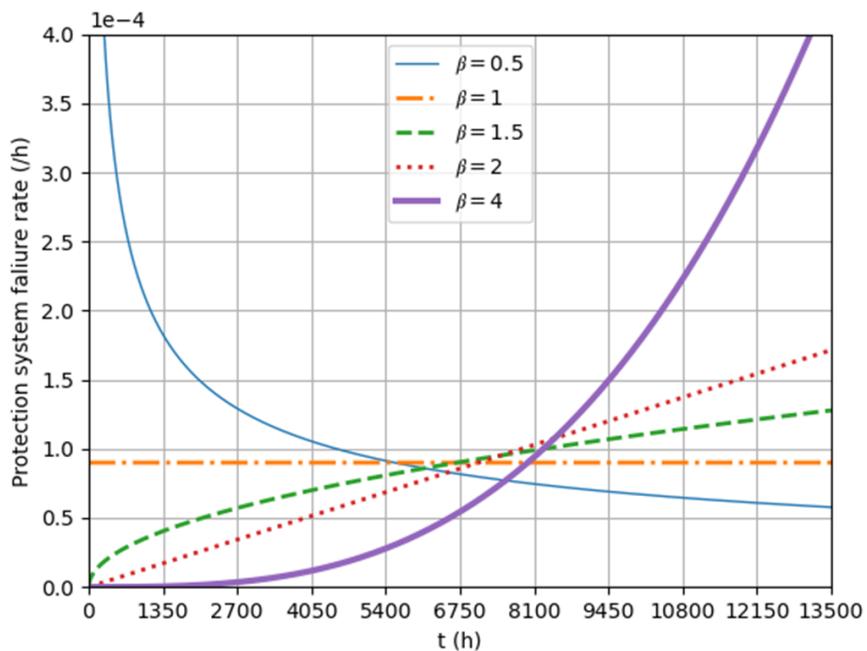
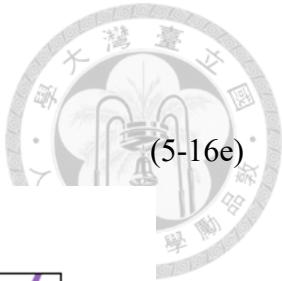


圖 5-46 防護子系統 $\lambda(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

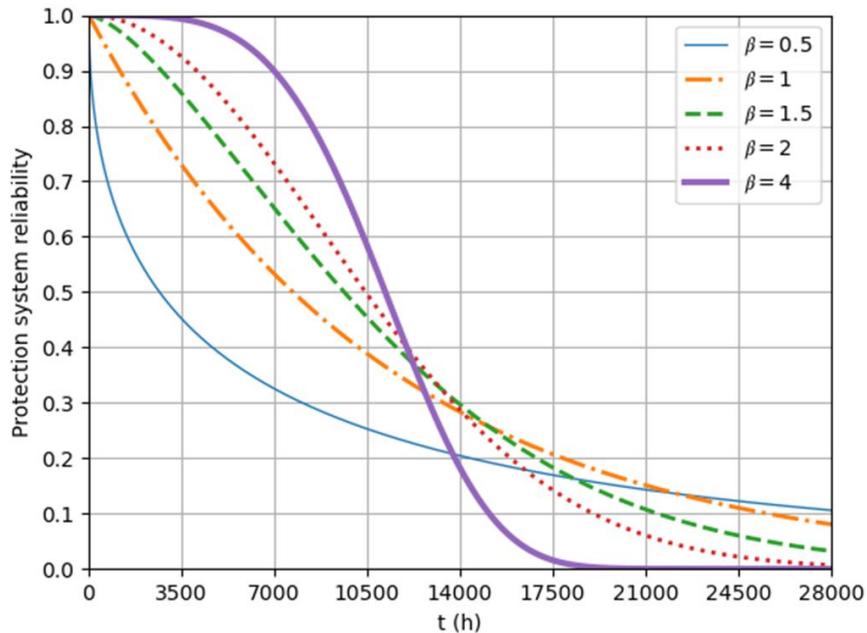


圖 5-47 防護子系統 $R(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

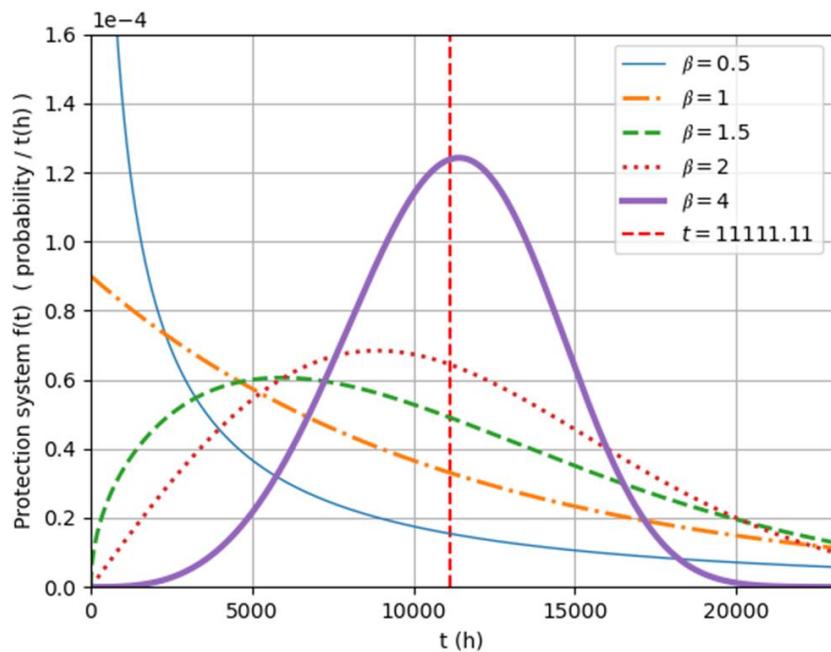


圖 5-48 防護子系統 $f(t)$ 圖 (MTBF = 1300 h)

5.3 結果與討論

圖 5-49 為車床系統 MTBF 在 1300 h 和 500 h 時刀塔子系統在 $\beta = 4$ 的比較，由下圖可知若將目標 MTBF 設定提升 2 倍多子系統的故障率隨著時間的增加將會差非常大，舉 $t = 1440$ h(工作半年)為例，刀塔子系統的故障率在 MTBF=500 h 時比 MTBF = 1300 h 高出大約 100 倍之多，由此可知在此分配方法下對於會老化的系統($\beta = 4$)，設定目標 MTBF 須非常小心。

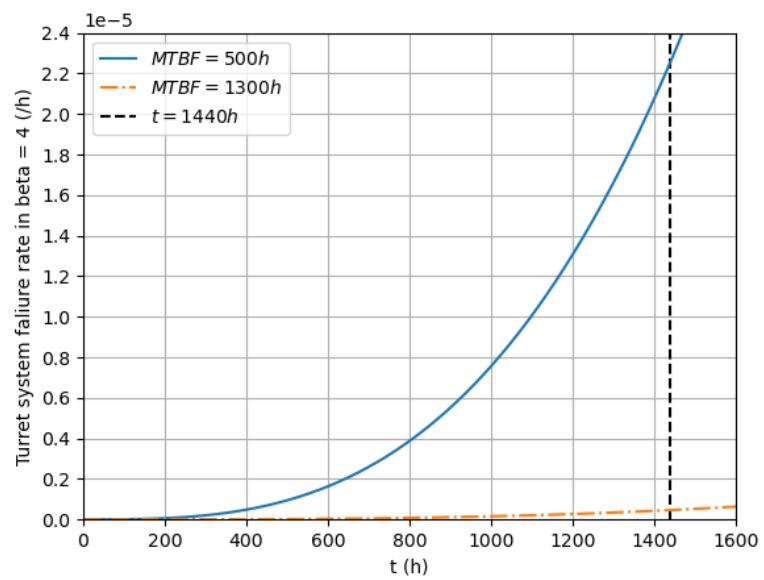


圖 5-49 不同目標 MTBF 下刀塔子系統之故障率差異

第六章 結論



為提升 CNC 車床在現代製造業中的應用效能，本研究透過系統化可靠度設計方法，深入探討 CNC 車床子系統的可靠度分配問題。我們將一 CNC 車床拆解成八個子系統，並選擇採用七項準則，依據所提出的全面故障率分配方法，結合 CNC 車床系統建模和總系統目標 MTBF，使各子系統的可靠度分配合理準確。我們透過分析結果，探討各子系統在韋伯分布下的故障率、可靠度和機率密度分布，以深入了解各子系統在不同參數值下的可靠度指標特徵。

我們統計國內可靠度學者專家針對各子系統與各準則可靠度分配權重所填答的問卷數據，透過本研究之可靠度分配方法進行 CNC 車床各子系統的可靠度分配，並且針對各子系統繪製出不同的可靠度指標。在故障率圖方面，由於子系統之故障率分布應較符合老化期之韋伯分布，所以我們較著重於此部分的圖形繪製。結果顯示，對於符合老化期韋伯分布之子系統，保養與維護是必須要執行的任務，此動作可以減緩可靠度隨時用使間下降的趨勢。最後我們也繪製出機率密度函數曲線，使我們瞭解各子系統可能發生故障之時間分布，並標示出各子系統的 MTBF 值。

因採擷到兩岸文獻數據之不同，我們也對兩岸 CNC 車床可靠度設計之差異進行比較與探討。依據問卷調查國內學者專家針對各準則及各子系統之權重結果以及所收集到臺灣與中國兩地的文獻資料，我們比較發現，在故障頻率方面，中國學者及其所發表的文獻顯示刀塔子系統與電子子系統的故障頻率相對較高，而台灣學者專家則認為複雜度高的電子子系統與主傳動子系統為前兩大潛在故障頻率較高的子系統，刀塔子系統的故障頻率反而是排在最後的子系統。以上之差異或許是源於認知的不同，中國大陸學者或許認為其他子系統的故障也會導致刀塔子系統的故障；而台灣學者則是分開思考，認為刀塔子系統只有小部分參與加工，故故障頻率最低。在故障嚴重度方面，中國文獻顯示刀塔子系統與可能連帶造成刀塔子系統故障的其它子系統故障的嚴重度最高，因若其失效導致加工件夾不



緊、滑出等，可能會直接危及到操作人為的生命安全；而台灣學者則認為嚴重程度相差不大，但認為包含主軸最高轉速、變速以及扭力的主傳動子系統的故障最為嚴重。在維護困難度與系統複雜度方面，我國學者基本上認為子系統越複雜則維護就越困難；反之，從中國大陸文獻的數據來看，有些子系統雖不複雜但卻是相對難維護的；以上或許可以反映兩國工具機技術與維修技術之差異。在非先進製造技術度方面，我國學者專家調查結果反映各子系統的製造先進度差異不大，最大與最小值值相差不到 1.5 倍；而中國大陸文獻則顯示各子系統相差接近 10 倍；這也許可以反映在兩國不同技術的發展快慢上。在工作環境劣質度方面，台灣學者認為工作環境最惡劣的子系統為會暴露於金屬碎屑和切削液，且承受持續的機械運動和摩擦的進給子系統；第二惡劣的為可能面臨油液洩漏和污染，長期工作可能導致油溫升高的液壓子系統；第三惡劣的則為直接接觸切削液和金屬碎屑，且長期處於潮濕環境，可能面臨化學腐蝕的冷卻子系統。中國學者與文獻則將上述皆排在偏後的排名，且最惡劣者為暴露於高溫、高壓的切削環境，受到金屬碎屑和切削液的持續衝擊，並承受高速旋轉和頻繁切換帶來的機械應力的刀塔子系統；這或許源由於兩岸加工材料的不同與保養與維護習慣的差異。在製造成本方面，由於大陸擁有廉價的零組件、原材料(如鋼、鐵等) 故在各子系統的總成本大致會比台灣的低。

本研究不僅針對 CNC 車床的可靠度設計提出方法論，也探討兩岸 CNC 車床可靠度設計與分配考量及分析結果之差異，希望能提供國內工具機製造業者參考。未來研究可進一步探索各子系統間的相互影響，以及在不同使用環境下的可靠度表現，以提升國產 CNC 車床的性能和市場競爭力。

參考文獻



- [1] Y. Wang, R. C. M. Yam, M. J. Zuo, and P. Tse, “A comprehensive reliability allocation method for design of CNC lathes,” *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 72, No. 3, pp. 247-252, Jun. 2001.
- [2] M. Zhang, Y. Cao, Z. Fang, and B. Chen, “Research on reliability distribution technology of CNC lathe HTC 2050,” *2016 ISCT Conference on Advances in Computer Science Research*, Vol. 64, Jan. 2016.
- [3] M. Tucci, F. D.B Carlo, O. Borgia, and N. Fanciullacci, “Accelerated life tests as an integrated methodology for product design, qualification and production control: a case study in household appliances,” *Production & Manufacturing Research: An Open Access Journal*, Vol. 2, No. 1, pp.112-127, Feb. 2014.
- [4] V. Duraccio, F. D. Felice, G. Bona, A. Forcina, and A. Silvestri, “Validation and application of a reliability allocation technique (advanced integrated factors method) to an industrial system,” *Proceedings of the IASTED Conference on Modelling, Identification and Control*, Feb. 2014.
- [5] K. K. Aggarwal, *Reliability Engineering*, Springer Science + Business Media, Dordrecht, Oct. 1993.
- [6] S. H. Dai and M. O. Wang, *Reliability Analysis in Engineering Application*, Van Nostrand Reinhold, June 1992.
- [7] V. Duraccio, L. Compagno, N. Trapani, and A. Forcina, “Failure prevention through performance evaluation of reliability components in working condition,” *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Vol. 16, pp.1092-1100, Oct. 2016.
- [8] L. M. Clement, “Reliability of military electronic equipment,” *Journal of the British Institution of Radio Engineers*, Vol. 16, No. 9, pp.488-495, Sep. 1956.



- [9] V. J. Bracha, "The methods of reliability engineering," *Machine Design*, pp. 70-76, Feb. 1964.
- [10] E. D. Karmiol, *Reliability Apportionment*, Preliminary Report EIAM-5, Task. II, General Electric, Apr. 1965.
- [11] Y. C. Chang, K. H. Chang, and C. S. Liaw, "Innovative reliability allocation using the maximal entropy ordered weighted averaging method," *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 57, No. 4, pp. 1274-1281, Nov. 2009.
- [12] C. H. Cheng, and J. R. Chang, "MCDM aggregation model using situational Me-OWA and Me-OWGA operators," *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, Vol. 14, No. 4, pp. 421-443, Aug. 2006.
- [13] K. H. Chang, C. H. Cheng, and Y. C. Chang, "Reliability assessment of an aircraft propulsion system using IFS and OWA tree," *Engineering Optimization*, Vol. 40, No. 10, pp. 907-921, Sep. 2008.
- [14] R.R. Yager, "On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 18, No. 1, pp.183-190, Jan. 1988.
- [15] 楊善國，可靠度工程概論，第六版，全華圖書股份有限公司，台灣，2019。
- [16] C. E. Ebeling, *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*, McGraw-Hill Inc, 1996.
- [17] F. Chen, X. Chen, Q. Xie, and B. Xu, "Reliability analysis of numerical control lathe based on the field data," *International Conference on Manufacturing Science and Engineering*, Jan. 2013.
- [18] Y. Wang, Y. Jia, J. Yu, Y. Zheng, and S. Yi, "Failure probabilistic model of CNC lathes," *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 65, No. 3, pp. 307-314, Sep. 1999.



- [19] F. L. Li, “The failure diagnosis and reliability growth technology research of the CAK3675V CNC lathes,” *Suzhou Chien-Shiung Institute of Technology, Taicang 215400*, Vol. 39, No. 11, pp. 71-76, May. 2012.
- [20] Y. W. Wang, Z. S. Wen, and G. X. Shen, “Inherent and operational reliability of CNC lathe,” *Natural Science Journal of Jilin University of Technology*, Vol. 30, No. 1, pp. 87-59, Jan. 2000.
- [21] A. Andhare, C. K. Tiger, and S. Ahmed, “Failure analysis of machine tools using GTMA and MADM method,” *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 1, No. 6, Aug. 2012.
- [22] Z. Yang, J. Guo, H. Tian, C. Chen, Y. Zhu, and J. Liu, “Weakness ranking method for subsystems of heavy-duty machine tools based on FMECA information,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 34, No. 17, Feb. 2021.
- [23] S. Saravanan, G. S. Yadava, and P. V. Rao “Machine tool failure data analysis for condition monitoring application,” *Proceedings of the 11th National Conference on Machines and Mechanism*, Delhi, India, Jan. 2003.
- [24] X. Zhu^{1,3}, J. Bao, J. Wang¹, F. Chen¹, X. Li, and X. Zhang, “A comprehensive maintainability evaluation methods for subsystems of CNC machine tools,” *Journal of Physics: Conference Series, Volume 1074, The International Conference on Mechanical, Electric and Industrial Engineering (MEIE2018)*, Hangzhou, China, May. 2018.
- [25] 曹芷欣，工具機安全系統之可靠度研究，國立臺灣海洋大學機械與機電工程學系碩士論文，2018。

附錄



問卷形式與結果

可靠度分配權重 調查問卷

本問卷一共分為兩部分：每一部分均附有說明和相應的問題。誠摯希望各位教授、專家能夠根據自身專業知識填寫回答。

第一部分：

針對 CNC 車床各子系統的可靠度分配，文獻曾列出下列七個準則：

1. 故障頻率高的子系統應分配到高的可靠度。
2. 故障嚴重度高的子系統應分配到高的可靠度。
3. 可維護度差的子系統應分配到高的可靠度。
4. 複雜度高(關鍵零件多)的子系統應分配到高的可靠度。
5. 採用非先進製造技術生產出的子系統應分配到高的可靠度。
6. 工作環境差的子系統應分配到高的可靠度。
7. 成本高的子系統應分配到高的可靠度。

依以上準則，您認為各準則重要程度為何？(勾選愈高分者表示愈重要)

1. 準則 1(故障頻率)：

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

2. 準則 2(故障嚴重度)：

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

3. 準則 3(可維護度)：

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

4. 準則 4(複雜度)：

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

5. 準則 5(製造技術)：

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

6. 準則 6(工作環境)：

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

7. 準則 7(成本)：

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

請問是否有其他準則被我們忽略了？

第二部分：

如果我們將一 CNC 車床拆解成車架 (Turret)、鎖模系統 (Clamping system)、電子系統 (Electric system)、主傳動系統 (Main driving system)、進給系統 (Feeding system)、液壓系統 (Hydraulic system)、冷卻系統 (Cooling system)、防護系統 (Protection system) 等八個子系統。

您認為各子系統在前述故障頻率、故障嚴重度、維護困難度、系統複雜度、是否為先進製造技術製作、工作環境好壞、成本高低各(因素)考量下的相對分數為何？

1. 各子系統相對故障頻率 (勾選分數愈高表示故障頻率愈高)：

Turret (車架)：

1 2 3 4 5 6 7 8

Clamping system (鎖模系統)：

1 2 3 4 5 6 7 8

Electric system (電子系統)：

1 2 3 4 5 6 7 8

Main driving system (主傳動系統)：

1 2 3 4 5 6 7 8

Feeding system (進給系統)：



1 2 3 4 5 6 7 8

Hydraulic system (液壓系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Cooling system (冷卻系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Protection system (防護系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

2. 各子系統故障相對嚴重度 (勾選分數愈高表示故障嚴重度愈高) :

Turret (車架) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Clamping system (鎖模系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Electric system (電子系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Main driving system (主傳動系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Feeding system (進給系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Hydraulic system (液壓系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Cooling system (冷卻系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Protection system (防護系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

3. 各子系統維護困難度 (勾選分數愈高表示維護愈困難) :



Turret (車架) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Clamping system (鎖模系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Electric system (電子系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Main driving system (主傳動系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Feeding system (進給系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Hydraulic system (液壓系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Cooling system (冷卻系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Protection system (防護系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

4. 各子系統相對複雜度 (勾選分數愈高表示愈複雜) :

Turret (車架) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Clamping system (鎖模系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Electric system (電子系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Main driving system (主傳動系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8



Feeding system (進給系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Hydraulic system (液壓系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Cooling system (冷卻系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Protection system (防護系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

5. 各子系統製造技術先進度 (勾選分數愈高表示製作技術先進程度愈低) :

Turret (車架) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Clamping system (鎖模系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Electric system (電子系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Main driving system (主傳動系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Feeding system (進給系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Hydraulic system (液壓系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Cooling system (冷卻系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Protection system (防護系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8



6. 各子系統工作環境優劣度 (勾選分數愈高表示工作環境愈差)：

Turret (車架)：

1 2 3 4 5 6 7 8

Clamping system (鎖模系統)：

1 2 3 4 5 6 7 8

Electric system (電子系統)：

1 2 3 4 5 6 7 8

Main driving system (主傳動系統)：

1 2 3 4 5 6 7 8

Feeding system (進給系統)：

1 2 3 4 5 6 7 8

Hydraulic system (液壓系統)：

1 2 3 4 5 6 7 8

Cooling system (冷卻系統)：

1 2 3 4 5 6 7 8

Protection system (防護系統)：

1 2 3 4 5 6 7 8

7. 各子系統製造成本 (勾選分數愈高表示製造成本愈高)：

Turret (車架)：

1 2 3 4 5 6 7 8

Clamping system (鎖模系統)：

1 2 3 4 5 6 7 8

Electric system (電子系統)：

1 2 3 4 5 6 7 8

Main driving system (主傳動系統)：

1 2 3 4 5 6 7 8

Feeding system (進給系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Hydraulic system (液壓系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Cooling system (冷卻系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

Protection system (防護系統) :

1 2 3 4 5 6 7 8

請問是否有其他需要考量的因素被我們忽略了？

感謝您花時間填答。如果本學位論文能順利完成，而你想獲得其電子檔案瞭解研究結果的話，請您於以下欄位留下您的電子郵件地址，我們屆時將再寄上論文檔案供您卓參。

