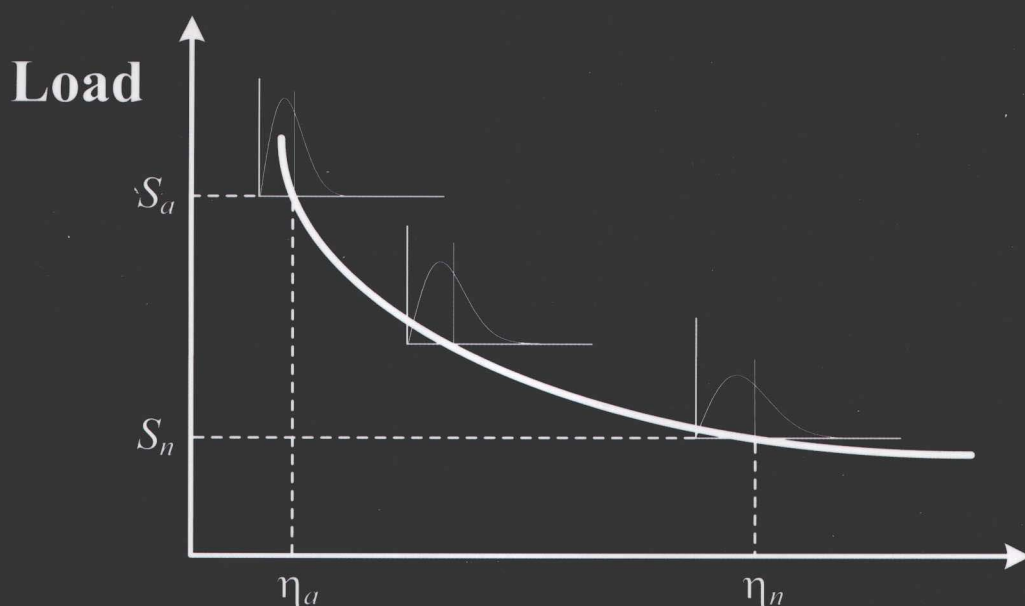


壽命驗證與評估

—— 加速試驗技術之應用

柯煒耀 著



Life Characteristic




科技圖書股份有限公司

壽命驗證與評估

—— 加速試驗技術之應用

柯 輝 耀 著

 科技圖書股份有限公司 出版

國家圖書館出版品預行編目資料

壽命驗證與評估—加速試驗技術之應用, 柯輝耀 著;—初
版 -- 臺北市: 科技圖書, 2012.04 564面: 19×26 公分

ISBN: 978-957-655-500-8 (平裝)

1. 產品檢驗 2. 品質管理

494.56

101006376

版權所有·翻印必究

壽命驗證與評估—加速試驗技術之應用

著 者/柯輝耀

出 版 者/科技圖書股份有限公司

發 行 人/張秉中

地 址/台北市忠孝西路一段50號17樓之35室

電話: (02)23707080 · 傳真: (02)23706160

網址: <http://www.techbook.com.tw/>

電子郵件: techbook@ms18.hinet.net

郵撥帳號: 0015697-3 · 戶名: 科技圖書股份有限公司

發 行 所/成陽出版股份有限公司

桃園市春日路1492號4樓之8

電話: (03)358-9000 · 傳真: (03)355-6521

印 刷/海王印刷事業股份有限公司

初 版/2012年6月(1000本)

定 價/新台幣600元

本書如有破損、裝訂錯誤，請寄回調換



科技圖書—Since 1969

自序

“經久”且“耐用”是顧客對產品必然的期待與要求，而無疑的“產品壽命”則是用來表徵產品經久耐用特質的代表性指標。但爲了提供產品壽命可符合需求的佐証，執行耗時的壽命試驗(Life test)驗證卻常是一件令人期待又怕受傷害的工作；因此，當壽命試驗與「加速(Accelerated)」一詞連袂出現時，似乎有意無意地暗示著 — 它可以快速且經濟地提供有關產品壽命特徵的必要資訊 — 就讓人充滿了好奇與希望；對專案經理而言，這更是一項充滿致命吸引力的誘惑。

但真能如此神效嗎？實務上，名爲壽命試驗，但目的、規劃原則及作法不同、所提供的資訊亦不相同的試驗類型非常多，有許多名爲壽命試驗的測試，真實的涵意卻是死亡試驗(Death test)，這類試驗所提供有關產品失效物理狀態的資訊遠超過產品可存活耐久的佐証。例如，名爲高加速壽命試驗(Highly Accelerated Life Test; HALT)的技術目前正盛行於業界與學界。綜合原創專家所發表及相關的應用文獻可知，本項技術是藉加嚴的測試應力，在研發初期以試驗技術發掘產品設計的潛在弱點，運用得宜即可據以改善設計，而使最終設計所得產品更具堅韌性(Robustness)。然而，此類試驗所提供之資訊屬於產品短期高應力失效機制的定性(Qualitative)資訊，並不能直接用來推論產品長期退化性失效的產品壽命；其意類似於無法以槍傷死亡數據推論人們老死的平均壽命，邏輯是一樣的。但上述說明並不意謂產品失效狀態的定性資訊不重要，而是強調不同類型試驗所提供的資訊各不相同，導入應用時不可有錯誤的期待，更應避免運用錯誤而導致損失。

本書以介紹運用試驗技術執行結果，正確地定量(Quantitative)評估產品壽命特徵(Life characteristic)爲目的；內容以個人從事產品品質工作及技術研究的心得爲基礎，結合各類推廣與輔導過程中，接觸業界所累積的經驗，運用驗證(Verification)與評估(Evaluation)的品質管理概念，針對以試驗方式進行產品壽命驗證的原則、規劃作業、所需技術與程序，以及就所得

壽命驗證與評估 — 加速試驗技術之應用

試驗數據進行產品壽命評估的方法與步驟逐項介紹。本書的核心則是以專章針對可用以縮短測試時間、節省資源之定量的加速壽命試驗(Accelerated Life Test; ALT)執行作法詳細介紹。此外，近年來個人負責大型研發專案之規劃與管理工作，對設計驗證與工程管理實務有了另一層次的體認，若干心得亦已適度地融入本書技術應用的章節中。

個人進入職場已超過二十年，除了從事品質工程與專案管理實務工作外，持續研究是個人自我的期許、與朋友分享心得則是其中最大的享受。本書出版發行，若能因此而對讀者在工作上有若干幫助、或在思維上有所啟發，便是本人編撰此書所獲得的最大回饋。

編撰技術專書是一項耗費心力的工程，家人的支持是個人在工作之外，尋求另一種自我肯定而持續付出的主要信心來源。本書是個人對國內品質工程技術升級與推廣的一份心意。但壽命試驗驗證牽涉廣泛，特別是加速壽命試驗更是一項複雜的進階技術，愈深入愈自覺不足，尚祈各界先進能不吝指導與指正，讓個人能不斷成長進步，不久的將來可有更理想的成果呈獻給大家。

一〇〇年十月卅日於臺北市

本書導讀

本書適合業界品質管理、設計與測試等從業人員閱讀，可作為工作上的參考資料或工具書；本書亦適合學校教師採用作為品質管理、品質工程、品質保證及可靠度保證等課程的教材，對將進入產業界服務的同學將可建立清楚、完整的產品壽命試驗驗證觀念與技術，有助於進入職場後可順利接軌工作。

首先，本書介紹產品壽命需求及規格的涵意，並簡要介紹壽命設計植入(Design-In)與驗證(Verification)之作法。本章是針對產品壽命意涵與設計驗證觀念的總體介紹，對讀者建立正確的壽命保證概念具有關鍵性的助益。其次，第二章介紹產品壽命試驗之規劃邏輯、原則與作法；第三章介紹壽命試驗數據之處置與分析，並說明不同壽命分佈之產品壽命特徵的統計估計方法；另為了滿足業界實務運用之履約驗收目的，第四章則介紹壽命試驗抽樣計畫之訂定方式。綜合運用第二、三、四章即可有效執行產品壽命規格之試驗驗證與評估工作。但由於執行壽命試驗往往必須投入大量的資源且異常耗時，因此，如何在有限的研製期程內，縮短試驗時間並降低成本，達到以試驗驗證產品壽命之目的，已是業界提昇競爭力的重要課題之一，因此，第五章特別詳細介紹有關產品加速壽命試驗(ALT)的觀念、應用原則及作法。除了觀念與理論介紹，本書更強調實用性，因此，各章節均盡可能地引用實例，說明實務應用的實施方式。

一般工程師或技術人員欲應用本書從事產品壽命之試驗規劃、分析與評估工作，建議配合本書之章節安排，有系統的瞭解各種壽命試驗驗證技術的作法，對實務工作將可有明顯的幫助；經營管理人員若欲參考本書，則建議在瞭解第一章有關產品壽命的總體概念後，視需要直接挑選適用的章節閱讀。但閱讀本書必須具備正確的品質管理觀念及執行微積分、機率與統計分析的基本能力，若讀者對這幾項課題仍然陌生，則建議讀者可先閱讀本書附錄或參考相關領域的專書及技術資料。

目 錄

	頁次
自序	iii
本書導讀	v
目錄	vii
第一章 產品壽命與設計驗證	1-1
1.1 前言	1-1
1.2 產品壽命需求	1-2
1.2.1 產品失效	1-2
1.2.2 產品壽命	1-7
1.2.3 壽命需求規格	1-10
1.3 壽命設計與驗證	1-13
1.3.1 設計植入	1-14
1.3.2 設計驗證	1-18
參考文獻	1-20
第二章 壽命試驗之規劃與執行	2-1
2.1 前言	2-1
2.2 整體試驗規劃	2-2
2.3 壽命試驗類型	2-6
2.4 壽命試驗之實施	2-9
2.4.1 試驗規劃	2-9
2.4.2 試驗執行計畫	2-62
2.4.3 試驗數據分析與結果研判	2-73
參考文獻	2-76
第三章 產品壽命評估	3-1
3.1 前言	3-1
3.2 壽命數據類型	3-2
3.3 產品壽命特徵估計	3-5
3.3.1 指數分佈	3-5
3.3.2 對數常態分佈	3-12
3.3.3 韋氏分佈	3-20

目 錄 (續)

	頁次
3.4 衰退壽命預測	3-32
3.5 磨損壽命評估	3-46
參考文獻	3-52
第四章 壽命試驗抽樣計畫	4-1
4.1 前言	4-1
4.2 抽樣計畫	4-2
4.2.1 基本觀念	4-2
4.2.2 允收機率與操作特性曲線	4-3
4.3 計數型抽樣計畫	4-10
4.3.1 無失效試驗規劃	4-11
4.3.2 允許失效之試驗規劃	4-29
4.4 計量型抽樣計畫	4-33
4.4.1 以指數分佈為基礎之試驗規劃	4-33
4.4.2 以韋氏分佈為基礎之試驗規劃	4-60
4.5 貝氏壽命試驗抽樣計畫	4-68
4.5.1 先驗分佈	4-70
4.5.2 貝氏壽命試驗抽樣規劃	4-71
4.5.3 無失效貝氏壽命試驗抽樣規劃	4-72
參考文獻	4-76
第五章 加速壽命試驗技術	5-1
5.1 前言	5-1
5.2 加速試驗	5-2
5.2.1 定性加速試驗	5-2
5.2.2 定量加速試驗	5-6
5.3 加速因子	5-12
5.3.1 定義	5-13
5.3.2 指數分佈加速因子	5-13
5.3.3 對數常態分佈加速因子	5-14
5.3.4 韋氏分佈加速因子	5-15
5.4 壽命應力模式	5-16

目 錄 (續)

	頁次
5.5 反覆加速壽命試驗	5-17
5.5.1 米勒假說	5-17
5.5.2 米勒定律之應用	5-24
5.5.3 應用米勒定律之相關問題	5-33
5.6 應力加速壽命試驗	5-34
5.6.1 定應力加速壽命試驗	5-34
5.6.2 步進應力加速壽命試驗	5-108
5.7 活化能	5-113
5.7.1 活化能的物理意義	5-113
5.7.2 以測試數據估計	5-115
5.7.3 以組合數據估計	5-120
5.7.4 多重失效模式之活化能估計	5-125
5.8 加速壽命試驗之運用	5-130
5.8.1 失效物理分析法概念	5-131
5.8.2 失效物理分析法執行程序	5-132
5.9 最後的提醒	5-135
5.9.1 執行陷阱	5-135
5.9.2 成功的關鍵	5-136
參考文獻	5-139
附錄 A 機率理論概述	A-1
附錄 B 產品可靠度概述	A-39
附錄 C 品質驗證與確認	A-49
附錄 D 設計驗證試驗與篩選技術概述	A-61
附錄 E 統計分析技術概述	A-95
附錄 F 常用機率分佈表	A-157
附錄 G 二項式抽樣計畫	A-165
附錄 H 辭彙索引	A-171

第一章

產品壽命與設計驗證

1.1 前言

進入廿一世紀，人們生活已離不開電腦、手機、微波爐、冰箱、電視機、汽車、機車 … 等等產品，當人們選擇這些生活周邊所經常使用的物品時，所反映的基本需求(Requirements)除了功能(Function)要素之外，其他的考慮重點往往就是經久(Endurance)、耐用(Environmental robustness)，而且要符合經濟條件，其中可用以具體展現經久耐用特質(Property)的產品特徵就是產品壽命(Life)。

何謂產品壽命？產品壽命內涵包括哪些要素(Element)？如何訂定壽命目標(Goal)才符合顧客或市場的需要？新產品的設計(Design)與發展(Development)工作如何推展才能達到目標？工程師又該如何證明已達成所訂定的產品壽命目標？這些議題若要獲得澄清或解答，則必須活用品質工程(Quality Engineering; QE)及品質保證(Quality Assurance; QA)的觀念、技術與管理方法；一旦這些要求必須以最具效能(Effectiveness)的方式完成，以符合顧客或市場期望且具備市場競爭力時，則解決的方案就是整體品質管理(Quality Management; QM)的議題。

本章將介紹產品壽命之定義與內涵、設計植入(Design-In)及設計驗證(Verification)的概念，以建立後續介紹產品壽命試驗與評估技術的基礎。

1.2 產品壽命需求

1.2.1 產品失效

所謂“失效”是指產品喪失執行其既定功能的能力。基本上，只有當產品可在工作環境中，具備大於所承擔之工作應力〔或負荷〕之強度的條件下，才可確保產品正常工作並滿足需求；換言之，產品可正常工作〔不失效〕機率之一般化表示式如下

$$\text{Pr}\{\text{產品正常工作}\} = \text{Pr}\{\text{強度} > \text{應力} | \text{環境}\}$$

反之，當產品強度低於應力時，即發生失效。產品失效的原因(Cause)主要可歸納為超應力(Overstress)及退化(Degradation)兩種類型：

- (1)超應力失效：肇因於超過產品實際強度(Strength)之應力(Stress)〔即破壞應力〕或負荷>Loading)作用，而造成瞬間致命(Catastrophic)失效的事件即稱之為“超應力失效”；
- (2)退化性失效：肇因於持續累積因超過產品耐久界限(Endurance limit)所造成的損傷則稱之為“累積〔或磨耗(Wearout)〕失效”。

其中因退化所衍生之失效機制(Mechanism)又可區分為以下兩種：

- (1)強度退化：此類失效係指隨著使用〔或測試〕時間增長，使產品強度退化到低於使用負荷>Loading)，如圖 1.1 所示之產品強度〔失效強度〕低於負荷而造成失效。此狀況可以人為方式終止、或繼續使用，直到功能消失為止，至此累積使用〔或測試〕時間即為產品壽命。不同強度分佈所對應之壽命變化即形成產品之壽命分佈〔或失效時間分佈〕。此類成因所產生的失效模式包括疲勞、潛變、老化等；
- (2)損傷累積：隨著使用〔或測試〕時間增長，產品損傷累積達一定程度、因超過最大允許損傷量〔如圖 1.2 所示〕導致無法再繼續使用，則稱之為“累積損傷〔或磨耗〕失效”，此時累積使用〔或測試〕時間即為產品壽命。不同強度達最大允許損傷量所對應之壽命變化即形成產品之壽命分佈〔或失效時間分佈〕。此類成因所產生之典型的失效模式則有磨耗、腐蝕、裂縫成長等。

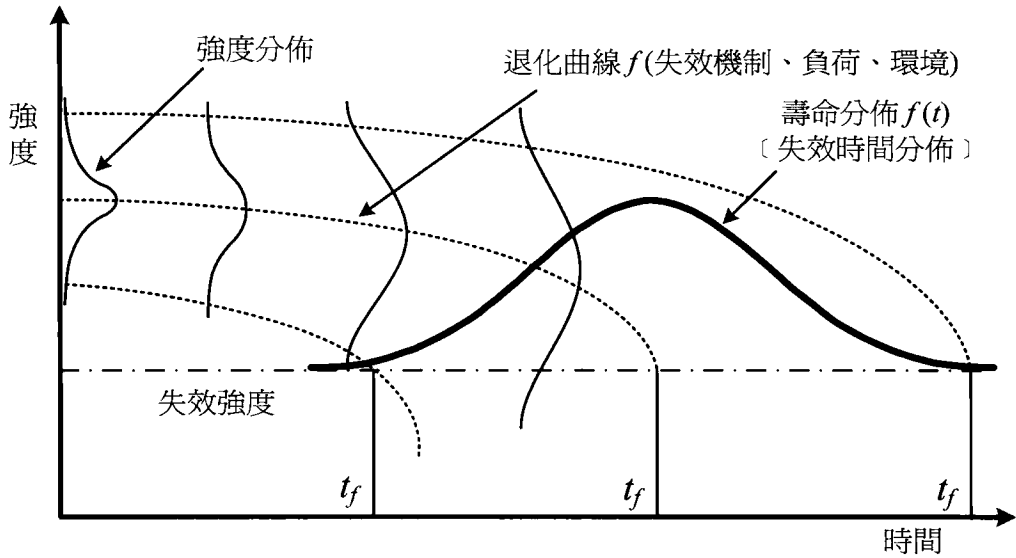


圖1.1 強度退化與產品壽命之關係示意圖

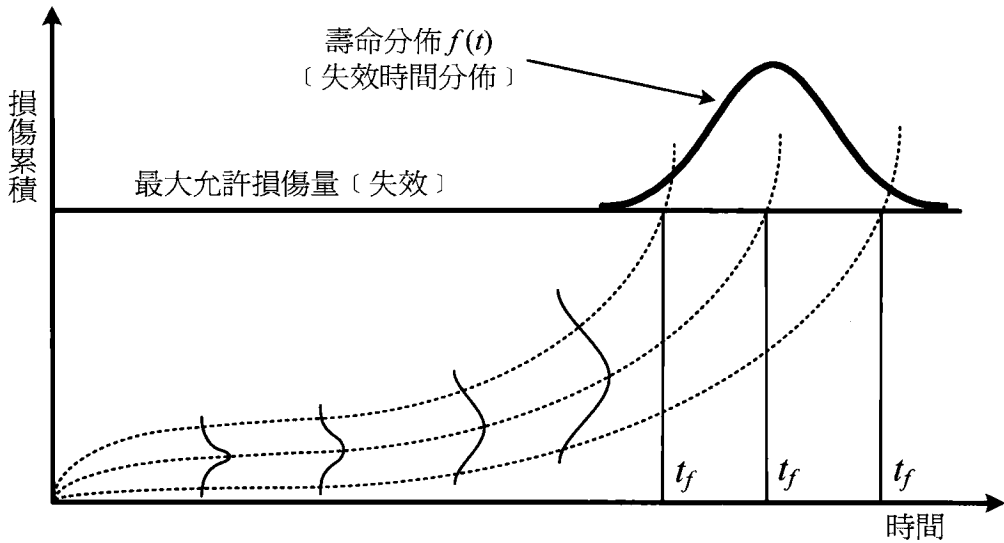


圖1.2 累積損傷與產品壽命之關係示意圖

綜合上述，不論是“強度退化”或“損傷累積”到達一定程度而致產品無法再繼續工作，其共同的因素就是產品強度無法承擔工作應力〔或負荷〕而導致失效；反之，當產品所具備的強度〔或能力〕大於所須承擔之應力〔或負荷〕時，即判定產品可正常運作而不失效。

壽命驗證與評估 – 加速試驗技術之應用

一般而言，影響產品強度與所承受之應力的設計變數很多，且設計變數均為其他多個基本設計隨機變數(Random variables)的函數〔有關隨機變數的說明可參考附錄 A〕；為掌握強度與應力間之關係，設計者須建立描述產品強度與使用時所承受之應力的關係式，此關係式即稱為產品性能函數(Performance Function)。對於僅具有單一失效模式的產品而言，一般可以強度應力干擾(Strength-Stress Interference; SSI)模式建立產品的性能函數(柯輝耀, 2007)。若強度 δ 與應力 s 均為連續隨機變數且兩個隨機變數互為統計獨立(Statistical independent)時，強度應力干擾模式如圖 1.3 所示，圖中的陰影部份即為干擾區；圖 1.4 則是針對干擾區域的放大示意圖。

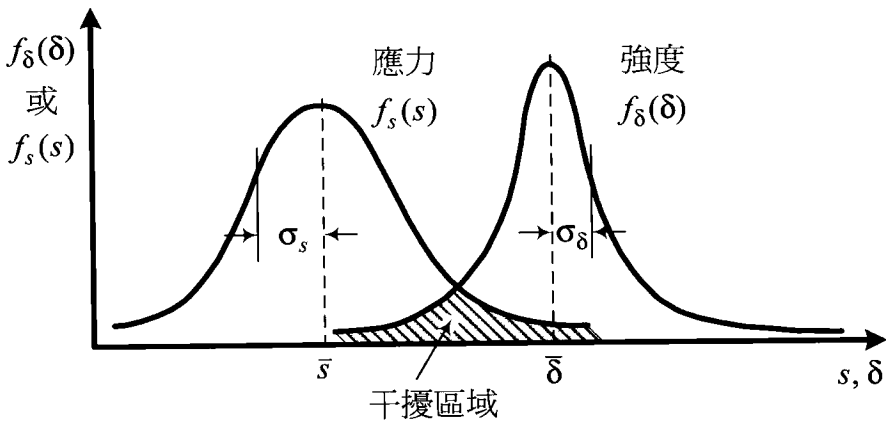


圖 1.3 強度應力干擾模式示意圖

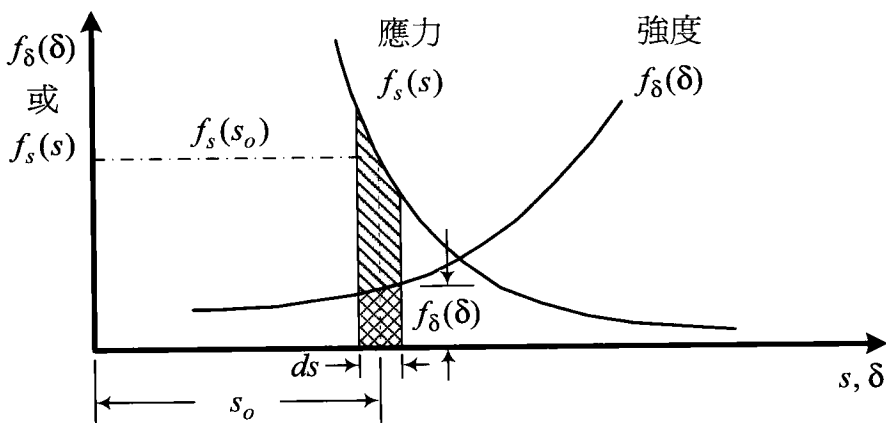


圖 1.4 強度應力干擾區域放大示意圖

由圖 1.4 之單斜線部份可見，應力恰在 ds 範圍內的機率等於在 $f_s(s)$ 曲線下 ds 這一段的面積，即

$$\Pr\left(s_o - \frac{ds}{2} \leq s \leq s_o + \frac{ds}{2}\right) = f_s(s_o) ds \quad (1.1)$$

其中 $f_s(\bullet)$ 代表應力 (s) 的機率密度函數(Probability Density Function; *pdf*)。此外，若強度 δ 的機率密度函數為 $f_\delta(\delta)$ ，則強度低於某一應力值 s_o 的機率可推算為

$$\Pr(\delta < s_o) = \int_{-\infty}^{s_o} f_\delta(\delta) d\delta \quad (1.2)$$

故可知應力恰在 ds 範圍內，而強度又低於此應力的機率

$$f_s(s_o) ds \cdot \int_{-\infty}^{s_o} f_\delta(\delta) d\delta \quad (1.3)$$

此時即可估計產品的失效機率 P_f 為

$$\begin{aligned} P_f &= \int_{-\infty}^{\infty} f_s(s) \left[\int_{-\infty}^s f_\delta(\delta) d\delta \right] ds \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f_s(s) F_\delta(s) ds \end{aligned} \quad (1.4)$$

其中 $F_\delta(\delta)$ 為強度之累積分佈函數(Cumulative Distribution Function; *cdf*)。相對的，產品不失效的機率 R 〔即可靠度(Reliability)工程領域所定義之產品可靠度，參見附錄 B 或柯輝耀(2007)〕則是在任何應力條件下，強度均大於應力的機率，在互斥(Exclusive)條件下，可依(1.4)式推算為

$$\begin{aligned} R &= 1 - P_f \\ &= 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_s(s) F_\delta(s) ds \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f_s(s) [1 - F_\delta(s)] ds \end{aligned} \quad (1.5)$$

在考慮多設計變數的狀況時，產品性能函數 $g(X)$ 則可定義為

$$g(X) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1.6)$$

其中 $X = x_1, x_2, \dots, x_n$ 代表由產品基本設計變數所構成的設計變數向量。一般而言，在設計時所考慮的變數多為時間 t 的函數〔例如材料強度受動態操作應力的影響而產生疲勞(Fatigue)、金屬材料受到銹蝕等現象都將造成強度退化〕，亦即 $X = X(t)$ ，但本章為簡化書寫，以下均以隱函數(Implicit function)的方式表示各項設計變數。

當性能函數 $g(X) = 0$ ，即代表產品處於平衡〔強度等於應力〕的臨界狀態，此狀態之性能函數亦稱為臨界狀態方程式(Limit State Equation)；當 $g(X) > 0$ 時，表示產品處於正常〔安全〕狀態；反之，則為失效狀態。以幾何學解釋，臨界狀態方程式 $g(X) = 0$ 為一 n 維曲面〔即“失效面(Failure surface)”〕，失效面的一側〔 $g(X) > 0$ 〕，產品在正常〔安全〕狀態；在另一側〔 $g(X) < 0$ 〕產品則處於失效狀態。

因此，若產品設計變數向量 X 的聯合機率密度函數(Joint Probability Density Function)為 $f(X)$ ，則其失效機率 F 與不失效機率 R 〔即產品可靠度〕可分別推算如下

$$F \equiv P_f = \int_{g(X) < 0} f(X) dX \quad (1.7)$$

$$R \equiv P_s = \int_{g(X) > 0} f(X) dX \quad (1.8)$$

如前所述，理論上推算(1.7)與(1.8)式時，均須考量隨機設計變數隨時間而產生的變化〔圖 1.5 即顯示單一失效模式之強度應力干擾隨時間而變化演進之關係示意圖〕，進而建立產品的失效時間分佈以估計產品壽命。

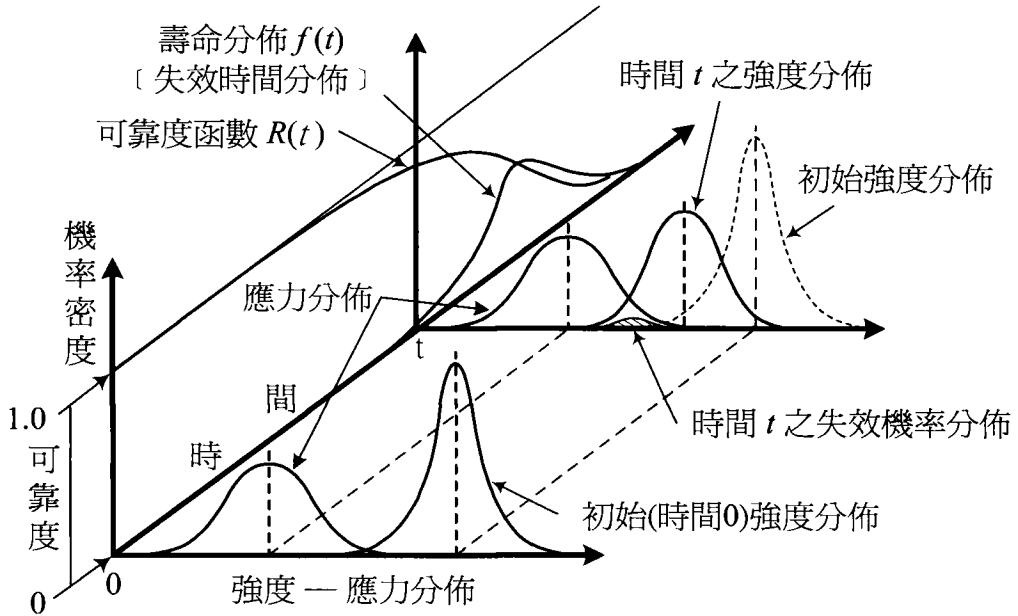


圖 1.5 時間因素對產品失效之影響示意圖

1.2.2 產品壽命

一旦產品製造完成即所謂“出生”，其後將經歷若干實質發揮功能的服務或工作階段，最終，當服務停止〔即廣義的產品失效(Failure)，包含產品功能喪失或異常、除役(Retirement)、更換(Replacement)或報廢(Disposal)等〕即到達“死亡”。一般稱此歷程為壽命週期(Life cycle)或服務壽命(Service life)。

產品或系統層次之服務壽命可以操作或使用現場之日曆時間或使用時間來定義〔例如飛機以飛行時數定義壽命〕；某些狀況，壽命亦可以專業習慣來度量而不是以時間概念來計算〔例如汽車常以行駛里程定義壽命〕，其間之差別主要是以構成產品壽命終止的要素來判斷。至於在零件或模組層次，多以其足以發揮功能直到失效無法工作為止來定義其壽命，並多以相同構型或更高品質之零件或模組更換處置。由於安全因素的考量，某些關鍵零組件或模組並不允許操作至失效為止，此類關鍵零組件或模組僅被容許使用一段固定時間，爾後即更換之；另有某些非關鍵之零組件或模組則是因成本或方便性的因素，依既定時間週期予以定期更換。兩者之服務壽命即均屬固定型式。

當影響產品功能之設計參數隨使用時間而產生變化時，其意即產品狀態亦將隨時間而改變，此時可定義產品失效時間 τ 不大於 t 〔隨機變數〕的機率 $F(t)$ 〔即累積分佈函數(*cdf*)或失效機率〕如下

$$\begin{aligned} F(t) &= \Pr(\tau \leq t) \\ &= \int_0^t f(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (1.9)$$

式中 $f(t)$ 即隨機變數 t 之機率密度函數(*pdf*)或失效時間分佈〔亦稱壽命分佈〕，故 $f(t)$ 與 $F(t)$ 之關係如下

$$f(t) = \frac{F(t)}{dt} \quad (1.10)$$

典型的產品失效時間分佈如圖 1.6 所示。

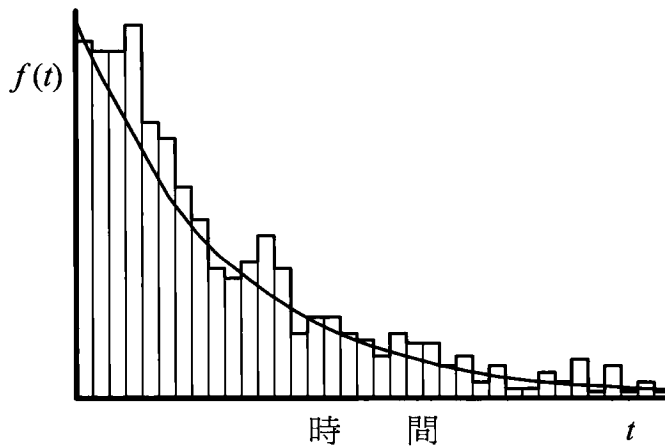


圖 1.6 典型產品壽命分佈示意圖

所謂「產品壽命(Life)」即定義為產品退化性失效發生時間的期望值 (Expected value)；若產品壽命分佈為 $f(t)$ ，則產品壽命之數學式即為

$$\text{Life} = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (1.11)$$