

工程設計可靠度

Reliability in
Engineering Design

原著者：K. C. Kapur

L. R. Lamberson

譯述者：元心山 趙淳霖

科技圖書股份有限公司

工程設計可靠度

Reliability in
Engineering Design

原著者：K. C. Kapur

L. R. Lamberson

譯述者：元心山 趙淳霖

科技圖書股份有限公司

譯 序

近代各類裝備製造精密性能優越，而價值亦極昂貴。在此種情形下，若故障頻生，其損失必極嚴重，故不只使用單位對於裝備可靠度應慎重選擇，製造工廠為保持信譽及加強售後服務，對於裝備可靠度尤應重視。

關於可靠度文獻，工業先進國家遠在 1940 年代即有若干論文發表，至 1960 年代，各種參考書籍亦相繼出版。反觀我國遲至 1979 年始有專論可靠度工程之書籍出版，迄今仍僅三數冊，為滿足中文讀者之需求，乃進行本書的翻譯工作。

本書內容相當豐富，其實務方面或理論方面均有詳盡清晰之敘述，例題與習題方面亦頗充實。故無論作為大專院校之教科書，或設計工程師之參考書，均不失為一本佳著。

本書原文係第一版，誤印之處不少。除譯者發現部份，中山科學研究院韋端博士亦提供若干誤印之處。以上情形在譯文中一併予以修正。

本書專用名詞的中文譯名，經予整理並列入附錄，俾供讀者參考。惟其中大部份譯名既無標準名詞且係初次使用，恐未盡合宜。敬祈專家先進及讀者不吝賜教，以備將來再版時予以更正。

最後，我們要感謝臺北工專前校長趙國華先生，他不只給我們鼓勵，更熱心出版此書。我們也要謝謝中山科學研究院韋端博士對於原文錯誤的提示，使本書譯本更為完美。

元心山
趙淳霖 謹識

中華民國七十一年春

原 序

我們在寫本書時，希望提供設計工程師或可靠度工程師應用的有關可靠度方面的基本知識。本書重點為產品可靠度的設計與試驗的計量化問題。很多修習可靠度課程的同學，係來自底特律的工業界，他們鼓勵我們寫成此書。因為這些同學都是很有經驗的工程師，他們對本書所介紹有關產品可靠度問題的解決方法幫助很大，對於這些同學，我們衷心的感謝。

一本這樣的書可包括很多章節，並以各種不同的次序編排。此處願就本書所採用的編排次序加以說明。

第一章為可靠度的介紹。這一章是檢討在可靠度的計量分析中所遭遇的各種問題，以及整體可靠度計劃中所應包括的必要項目。第二章討論在可靠度試驗中所使用的特殊名詞以及度量方式，並給與明確的定義。在特殊名詞中，包括計量與非計量性質。這些名詞很容易被誤用或文義不明，所以儘量設法提出明確而完善的定義，使同學們能正確使用這些與可靠度有關的名詞。第三章是介紹一些簡單的靜態可靠度模式。合併第二章與第三章可使學生對可靠度方面的名詞獲得一基本瞭解。

我們應該知道，第二章與第三章的先後次序是可以互換的，而且在某些講授情況下，先講第三章或許更為合適，我們選擇先從第二章較困難的教材講起，然後再講使學生很容易觸類旁通的第三章教材，這是希望在講授第三章時使學生能熟習第二章所講的若干概念以及定義等。

因為可靠度在基本上是一個設計參數，而且早在設計階段即已深植在系統內。故在本書中，我們特別注重產品的設計過程與可靠度間的關係。本書提供學生一些評估及驗證設計可靠度的方法，就目前工程情況而言，設計可靠度為一比較新的項目。本章主要說明在設計

中增進可靠度的技巧與其他設計方面的改進，均同樣重要。

在任何系統設計中，設計變數以及設計參數均有其機率性。可以決定組件強度以及應力的有關因素亦具機率性，這也就是說，當我們衡量某項設計的可靠度時，有關該系統的變數以及參數的機率性，必須加以考慮。第四章是討論應用機率分析設計與可靠度的方法。第五章及第六章擴展到根據可靠度的觀點，分析複雜設計所需使用的技巧。具體的說，第五章是討論設計變數的結合，以及應用於統計容差的計算，這一章使學生能了解設計可靠度問題中所需的進一步數理統計方法。第六章係介紹在變數與參數的機率模式設定後，如何進行設計可靠度的方法。在第七章中，利用簡單的設計例題以解釋設計可靠度的技術。更進一步的依時間改變的應力與強度模式，則在第八章中加以介紹。

第九章是討論動態可靠度模式，並配合提出修復度的概念。我們認為，此時同學應已很熟習統計學的應用，自不難學習本章的教材。

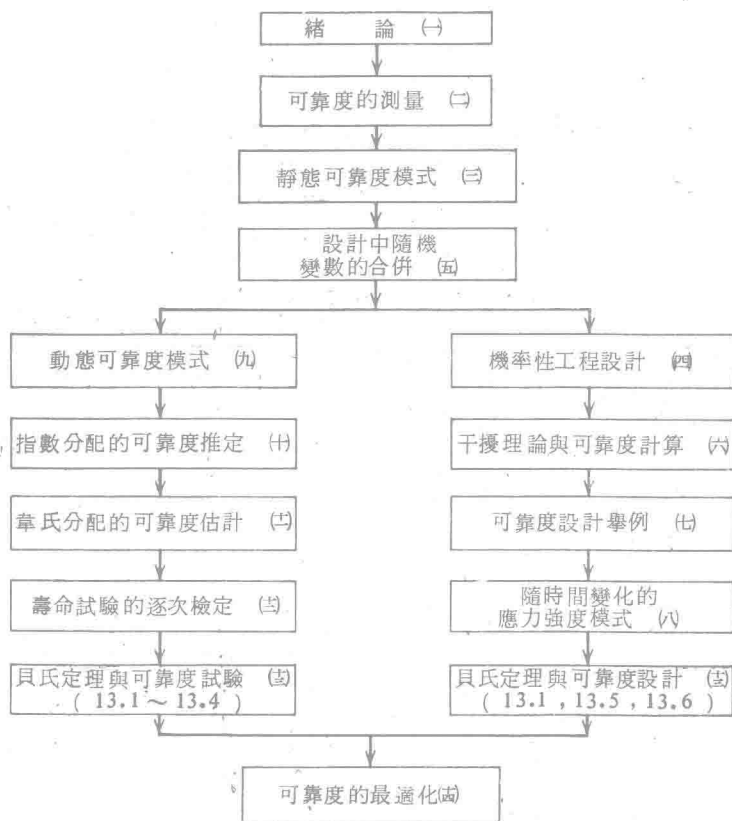
發展任一新產品時，在設計完成後必繼之以試驗，因此，第十章及第十一章即為討論利用試驗所得數據以估計可靠度問題。具體的說，第十章是假定指數分配模式時，各種不同的試驗情況下對可靠度的估計方法。對每種不同情況，其適用的必要條件均予詳加說明，其公式的導出則均列入附錄中以供深入研究同學的參攷。在第十一章中，係利用韋氏分配作為產品壽命的模式。本章中對圖解法及數學分析法均有說明。

第十二章為可靠度驗證的逐次檢驗法，包括所使用的方法以及若干實際應用問題的說明。

第十三章係將貝氏統計法則應用於產品試驗這一新的領域，我們應該承認在很多情況下設計工程師對系統性能均已具有相當程度的事先瞭解。如果試驗計劃良好，這一部份知識應予把握，並予數量化。在實際作業中，設計及試驗工程師已直覺的運用事先已具的知識，因而並不須採用統計學上所要求的大樣本檢定。本章即就此種觀念對於有關進行試驗問題，以及如何利用事先已有的知識一併予以說明。

工程設計與可靠度問題的解答，常須在多種不同的方案下求得一

最適的折中方案。設計的特性，則視固定參數與可調整參數的配合而定。第十四章係介紹在設計過程中可靠度的最適化技巧。本章主要在討論設計工程師應考慮的很多因素間的交換問題，而成本為一當然因素。本章同時並介紹設計工程師應了解的非線性最適化理論。如欲充分了解本章教材，最好能預先修習有關最適化的課程。



我們建議本書作為學校教科書，宜分兩個學季講授。若作為工廠工程師不計學分的進修課程，則分成八十小時的講習教材。不論屬於那一種情況，學生均須具有應用科學或工程方面的基礎，以及至少在

機率論或統計學中選修過一門課，自然最好是兩門均已修習。

如果課程重點置在可靠度的設計方面，則第一章到第八章以及第十三章，第十四章均須包括在內。但若重點置在可靠度的試驗則應包括第一至第三章，第五章，以及第九至第十四章。這兩種不同重點的教材次序，可參考教材編列次序圖。當然，尚有其他不同的教材編排方式以適合一學季或一學期的課程使用。不過教材包括的內容總以配合學生在統計方面的基礎、修讀的目的以及教授的觀點而定。

本書教材可適合各種不同科系學生之用。在我們授課的班級中，差不多每一種工程科系的同學以及數學系與物理系的同學均有。

著者必須感謝若干機構使我們獲得在可靠度方面的知識與經驗。我們在通用汽車公司雪佛蘭汽車廠，美國陸軍戰車汽車司令部以及福特汽車公司等機構工作中所獲得的經驗，對本書的編寫工作均受到極大幫助。

我們並感謝本校工業工程與作業研究的研究所助理鮑爾先生，對本書原稿以及習題部份所提供的多項建議與批評。同時我們也衷心感謝近五十位同學們研讀最後完稿，以及提出建議與修正，這些都給了我們極大的幫助。

K.C. Kapur 卡普

L.R. Lamberson 藍勃森

目 錄

譯 序

原 序

符號索引及主要度量單位表

第一章 緒 論

1.1 可靠度的設計.....	1
1.2 可靠度的管理.....	2
1.3 產品試驗.....	3
1.4 可靠度與人體工程.....	3
1.5 可靠度的成長.....	3
1.6 設計檢討、故障形式及缺點樹分析.....	4
1.7 可靠度發展簡史.....	5
1.8 本書範圍.....	5
參考書目.....	6

第二章 可靠度的量測

2.1 可靠度函數.....	9
2.2 期望壽命.....	10
2.3 故障率與故障率函數.....	12
2.4 著名的壽命分配、可靠度與故障率函數.....	16
2.5 故障模式與產品壽命.....	29
2.6 故障率函數、故障密度函數與可靠度函數的估計.....	33

2.7	理論機率分配選擇的檢討	38
2.8	本章綱要	51
	習題	52
	參考書目	57

第三章 靜態可靠度模式

3.1	串聯系統	59
3.2	並聯系統	61
3.3	串並聯系統	63
3.4	複雜系統的分析	65
3.5	設計中對可靠度的考慮	66
3.6	本章綱要	71
	習題	72
	參考書目	76

第四章 機率性工程設計

4.1	機率性設計方法	79
4.2	強度及應力的機率分配	81
4.3	安全因數與可靠度	82
4.4	機率性設計的可靠度範圍	92
4.5	本章綱要	96
	習題	96
	參考書目	97

第五章 設計中隨機變數的合併

5.1	隨機變數的轉換	100
5.2	隨機變數的函數的期望值與變異數	102
5.3	常態隨機變數的和與差	103
5.4	隨機變數的函數的動差計算	105
5.5	統計的公差	117

5.6	本章綱要	119
	習題	119
	參考書目	126

第六章 干擾理論與可靠度計算

6.1	可靠度的通用數學式	127
6.2	強度與應力均為常態分配時可靠度計算	131
6.3	強度與應力為對數常態分配時可靠度計算	135
6.4	強度與應力為指數分配時可靠度計算	143
6.5	強度與應力分別為常態及指數分配時可靠度計算	143
6.6	強度與應力為伽瑪分配時可靠度計算	145
6.7	應力為常態分配，強度為韋氏分配時可靠度計算	148
6.8	強度與應力均為韋氏分配時可靠度計算	152
6.9	依應力與強度實驗數據的可靠度圖解法	153
6.10	強度與應力為極值分配時可靠度計算	159
6.11	本章綱要	164
	習題	166
	參考書目	169

第七章 可靠度設計舉例

7.1	拉力元件的設計	171
7.2	工字樑的設計	174
7.3	受扭力圓軸的設計	177
7.4	蓋罩扭力桿的設計	180
7.5	本章綱要	192
	習題	192
	參考書目	194

第八章 隨時間變化的應力強度模式

8.1	應力與強度的分類	199
-----	----------	-----

8.2	固定週期時間的可靠度計算	201
8.3	隨機週期時間的可靠度計算	209
8.4	老化、週期損傷、與累積損傷情形下的可靠度	214
8.5	本章綱要	219
	習題	220
	參考書目	221

第九章 動態可靠度模式

9.1	串聯系統與有關模式	222
9.2	並聯系統模式	226
9.3	備用複聯系統	229
9.4	分載並聯模式	234
9.5	系統功效的衡量	236
9.6	本章綱要	240
	習題	241
	參考書目	244

第十章 指數分配的可靠度推定

10.1	指數分配在統計學上的特性	245
10.2	故障數據分析	249
10.3	平均壽命之推定	263
10.4	最低壽命假定為零時，平均故障時間的信賴區域	265
10.5	可靠度與百分點信賴界限之推定	271
10.6	非零最低壽命情況的分析	273
10.7	假設之檢定	276
10.8	完成壽命試驗所需的期望時間	283
10.9	本章綱要	283
	附錄：有關技術參考資料	285
	10. A 指數分配與卜氏分配的關係	285
	10. B 指數分配與卡方分配的關係	287

10. C	平均壽命的最大概似推定值	288
10. D	信賴界限的求法	291
10. E	非零最低壽命	298
10. F	試驗的期望時間	301
習題		302
參考書目		307

第十一章 韋氏分配的可靠度估計

11.1	韋氏分佈在統計學上的特性	309
11.2	圖解估計法	313
11.3	統計估計程序	342
11.4	雙參數韋氏分配的配合度檢定	350
11.5	利用截略試驗以縮短試驗時間	352
11.6	本章綱要	353
附錄		353
習題		355
參考書目		358

第十二章 壽命試驗的逐次檢定

12.1	逐次檢定的理論	361
12.2	逐次檢定的進行程序	369
12.3	提前終止試驗的逐次檢定	384
12.4	本章綱要	384
習題		385
參考書目		386

第十三章 貝氏定理對可靠度設計與試驗的應用

13.1	貝氏統計推測的應用	388
13.2	二項分配壽命試驗	397
13.3	指數分配壽命試驗	405

13.4	逐次檢定的貝氏分析法	411
13.5	貝氏定理對於可靠度設計的應用	417
13.6	承受隨機應力組件的可靠度設計	420
13.7	本章綱要	427
	習題	427
	參考書目	429

第十四章 可靠度的最適化

14.1	可靠度的配置	431
14.2	可靠度分配的動態規畫解法	441
14.3	機率性設計的最適化	450
14.4	本章綱要	461
	習題	463
	參考書目	468

附 錄

一	標準常態密度函數的座標高度值	470
二	累積常態分配函數	472
三	常態分配應力與韋氏分配強度的可靠度數值表	474
四	最大極值分配應力(第 I、II 型)與韋氏分配強度的可靠度數值表	483
五	卡方分配的百分點	492
六	F 分配的百分點	496
七	指數分配壽命檢定的操作特性曲線	508
八	等級表(中位值、5%值、95%值)	514
九	韋氏分配參數指定的權數	526
十	統計值 $W = \tilde{b} / b$ 分配的百分點	567
十一	統計值 $(\tilde{u} - u) / b$ 分配的百分點	573
十二	統計值 $V_R = (\tilde{u} - x_R) / \tilde{b}$ 分配的百分點	578
十三	兩參數韋氏分配適合性檢定的統計值 S 分配的百分點	594
	英漢名詞對照表	604

譯 序

近代各類裝備製造精密性能優越，而價值亦極昂貴。在此種情形下，若故障頻生，其損失必極嚴重，故不只使用單位對於裝備可靠度應慎重選擇，製造工廠為保持信譽及加強售後服務，對於裝備可靠度尤應重視。

關於可靠度文獻，工業先進國家遠在 1940 年代即有若干論文發表，至 1960 年代，各種參考書籍亦相繼出版。反觀我國遲至 1979 年始有專論可靠度工程之書籍出版，迄今仍僅三數冊，為滿足中文讀者之需求，乃進行本書的翻譯工作。

本書內容相當豐富，其實務方面或理論方面均有詳盡清晰之敘述，例題與習題方面亦頗充實。故無論作為大專院校之教科書，或設計工程師之參考書，均不失為一本佳著。

本書原文係第一版，誤印之處不少。除譯者發現部份，中山科學研究院韋端博士亦提供若干誤印之處。以上情形在譯文中一併予以修正。

本書專用名詞的中文譯名，經予整理並列入附錄，俾供讀者參考。惟其中大部份譯名既無標準名詞且係初次使用，恐未盡合宜。敬祈專家先進及讀者不吝賜教，以備將來再版時予以更正。

最後，我們要感謝臺北工專前校長趙國華先生，他不只給我們鼓勵，更熱心出版此書。我們也要謝謝中山科學研究院韋端博士對於原文錯誤的提示，使本書譯本更為完美。

元心山
趙淳霖 謹識

中華民國七十一年春

原 序

我們在寫本書時，希望提供設計工程師或可靠度工程師應用的有關可靠度方面的基本知識。本書重點為產品可靠度的設計與試驗的計量化問題。很多修習可靠度課程的同學，係來自底特律的工業界，他們鼓勵我們寫成此書。因為這些同學都是很有經驗的工程師，他們對本書所介紹有關產品可靠度問題的解決方法幫助很大，對於這些同學，我們衷心的感謝。

一本這樣的書可包括很多章節，並以各種不同的次序編排。此處願就本書所採用的編排次序加以說明。

第一章為可靠度的介紹。這一章是檢討在可靠度的計量分析中所遭遇的各種問題，以及整體可靠度計劃中所應包括的必要項目。第二章討論在可靠度試驗中所使用的特殊名詞以及度量方式，並給與明確的定義。在特殊名詞中，包括計量與非計量性質。這些名詞很容易被誤用或文義不明，所以儘量設法提出明確而完善的定義，使同學們能正確使用這些與可靠度有關的名詞。第三章是介紹一些簡單的靜態可靠度模式。合併第二章與第三章可使學生對可靠度方面的名詞獲得一基本瞭解。

我們應該知道，第二章與第三章的先後次序是可以互換的，而且在某些講授情況下，先講第三章或許更為合適，我們選擇先從第二章較困難的教材講起，然後再講使學生很容易觸類旁通的第三章教材，這是希望在講授第三章時使學生能熟習第二章所講的若干概念以及定義等。

因為可靠度在基本上是一個設計參數，而且早在設計階段即已深植在系統內。故在本書中，我們特別注重產品的設計過程與可靠度間的關係。本書提供學生一些評估及驗證設計可靠度的方法，就目前工程情況而言，設計可靠度為一比較新的項目。本章主要說明在設計

中增進可靠度的技巧與其他設計方面的改進，均同樣重要。

在任何系統設計中，設計變數以及設計參數均有其機率性。可以決定組件強度以及應力的有關因素亦具機率性，這也就是說，當我們衡量某項設計的可靠度時，有關該系統的變數以及參數的機率性，必須加以考慮。第四章是討論應用機率分析設計與可靠度的方法。第五章及第六章擴展到根據可靠度的觀點，分析複雜設計所需使用的技巧。具體的說，第五章是討論設計變數的結合，以及應用於統計容差的計算，這一章使學生能了解設計可靠度問題中所需的進一步數理統計方法。第六章係介紹在變數與參數的機率模式設定後，如何進行設計可靠度的方法。在第七章中，利用簡單的設計例題以解釋設計可靠度的技術。更進一步的依時間改變的應力與強度模式，則在第八章中加以介紹。

第九章是討論動態可靠度模式，並配合提出修復度的概念。我們認為，此時同學應已很熟習統計學的應用，自不難學習本章的教材。

發展任一新產品時，在設計完成後必繼之以試驗，因此，第十章及第十一章即為討論利用試驗所得數據以估計可靠度問題。具體的說，第十章是假定指數分配模式時，各種不同的試驗情況下對可靠度的估計方法。對每種不同情況，其適用的必要條件均予詳加說明，其公式的導出則均列入附錄中以供深入研究同學的參攷。在第十一章中，係利用韋氏分配作為產品壽命的模式。本章中對圖解法及數學分析法均有說明。

第十二章為可靠度驗證的逐次檢驗法，包括所使用的方法以及若干實際應用問題的說明。

第十三章係將貝氏統計法則應用於產品試驗這一新的領域，我們應該承認在很多情況下設計工程師對系統性能均已具有相當程度的事先瞭解。如果試驗計劃良好，這一部份知識應予把握，並予數量化。在實際作業中，設計及試驗工程師已直覺的運用事先已具的知識，因而並不須採用統計學上所要求的大樣本檢定。本章即就此種觀念對於有關進行試驗問題，以及如何利用事先已有的知識一併予以說明。

工程設計與可靠度問題的解答，常須在多種不同的方案下求得一