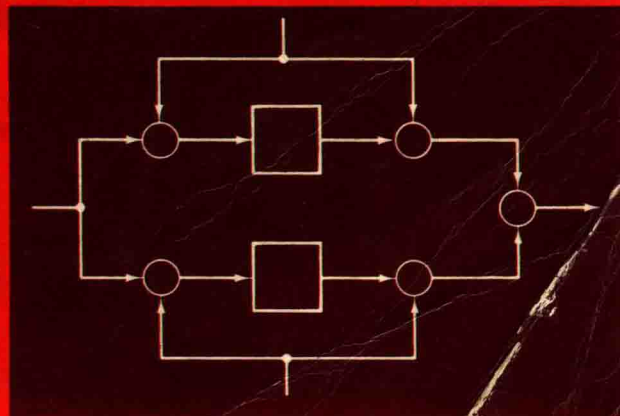
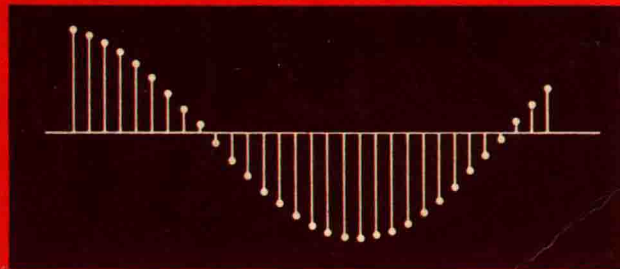
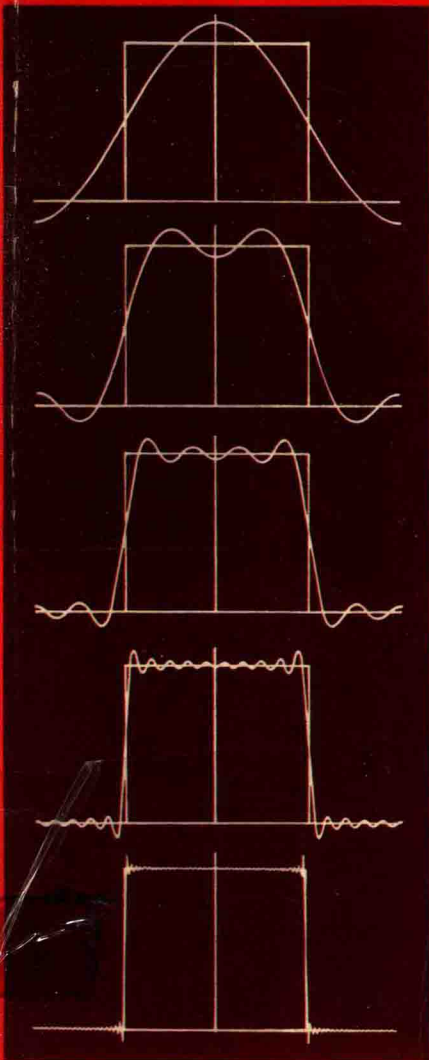
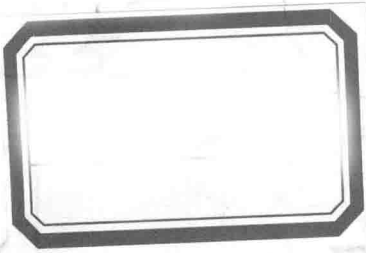


信號與系統

李良志 編譯



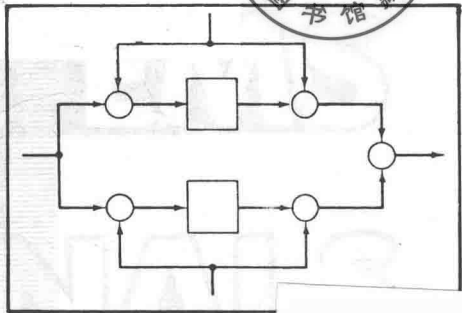
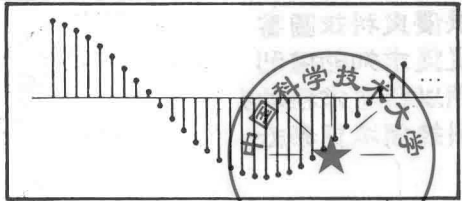
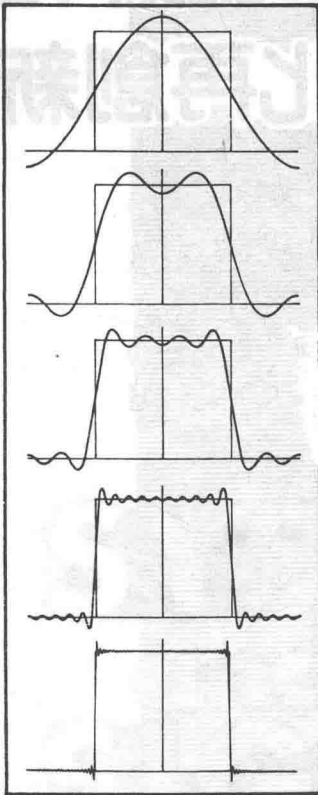
全華科技圖書股份有限公司 印行



大 專 用 書

信號與系統

李良志 編譯



全華科技圖書股份有限公司

法律顧問：陳培豪律師

信號與系統

李良志 編譯

定價 新台幣 480 元

再版 / 79年12月

圖書編號 0121818

版權所有·翻印必究

出版者 / 全華科技圖書股份有限公司

地址：台北市龍江路76巷20-2號2樓

電話：5071300(總機) FAX:5062993

郵撥帳號：0100836-1號

發行人 / 陳 本 源

印刷者 / 宏懋打字印刷股份有限公司

行政院新聞局核准登記證局版台業字第〇二二三號

ISBN 957-21-0043-2

我們的宗旨：

提供種類完備的教科書 為科技中文化再創新猷

資訊蓬勃發展的今日，
全華本著「全是精華」的出版理念
以專業化精神
提供優良科技圖書
滿足您求知的權利
更期以精益求精的完美品質
為科技領域更奉獻一份心力！

●●● 為保護您的眼睛，本公司特別採用不反光的米色印書紙！！

ALAN V. OPPENHEIM
ALAN S. WILLSKY

with
IAN T. YOUNG

SYSTEMS
and
SIGNALS

原 序

本書適用於大學本科信號與系統課程的教科書。雖然這類課程通常是電氣工程系的課程，但是，作為該課程核心的一些基本概念和方法，對於所有工程專業來說也都是很重要的。隨著工程師們面臨著需要對一些複雜的過程進行分析與綜合的新挑戰，事實上，信號與系統分析方法潛在的和實際的應用範圍都一直在擴大著。為此感到，信號與系統課程不僅是工程教學中一門非常基本的課程，而且也成為工科學生在大學教育階段所修課程中最有得益而又引人入勝和最有用處的一門課。

關於信號與系統課程的處理和論述，是在麻省理工學院(M. I. T.) 電氣工程與計算機科學系講授該方面第一門課講稿的基礎之上形成的。總括來說是考慮到這樣一點，即：根據信號與系統設計和實現方法上的新進展及對將來的展望，迫切需要對連續時間和離散時間系統分析和綜合技術都很熟悉。為了實現這一目的而選擇了對連續時間和離散時間信號與系統採用並行的分析方法。這一途徑在教學上也是十分可取的，它可以利用連續和離散時間方法之間共同點來分享各自所獲得的概念和觀點；而兩者之間的差異又可用來加深理解各自不同的獨特性質。

在材料組織方面，我們還認為本書所論述的基本方法在某些重要方面的應用也應該作為基本的東西介紹給學生。這樣做不僅是讓學生了解到目前所學內容的某些應用方面和進一步研究的方向，而且還有助於加深對問題本身的理解。為此，就濾波、調變、取樣、連續時間信號的離散時間處理以及反饋等方面的內容都作了入門性介紹。另外，為了幫助願意繼續在信號與系統分析方法和應用方面深入學習的學生，書末還附有參考文獻目錄。

我們相信，要全面掌握這門課，若沒有一定數量且能應用這些基本方法的練習，是不可能完成的，本書的編排也瞭解了這一點。因此，在每一章末都收集了幾個類型，總數達到350多題的課外習題。當然，其中許多是對各章所涉

及到的基本方法的訓練；但也有不少習題是要求學生應用這些方法去解決一些重要的實際問題；另外一些則是要求學生進行深入的思考以擴大大書所獲得的概念。習題種類的多樣化和提供的數量都希望能夠給教師有相當大的靈活性來進行合理的剪裁以滿足各類學生的需要。

使用本書的學生，假定已具有基本微積分學方面的基礎，有進行複數運算的能力，以及在微分方程方面也有某些接觸。有了這些基礎以後，本書就自成體系了，尤其是不需要事先具備系統分析、捲積、傅立葉分析或拉氏變換和正變換等方面的知識。在學習信號與系統課之前，大多數學生或許都上過適合於電氣工程師們所要求的基本電路理論課，或者是針對機械工程師們所用的動力學原理這樣的課；這些課都多少接觸一些本書將要給予深入討論的那些基本概念。在學習本書時，這些基礎很顯然對於學生深入理解本書內容都會有很大的意義。

第一章是簡短緒論，概述有關信號與系統課的出發點和看法，特別是我們對這一問題的觀點和處置。第二章從介紹了信號和系統中的數學表示，及有關的基本概念，特別是討論了一個信號獨立變量的某些變換（如時移和尺度變換），接著介紹了某些最重要的基本連續時間和離散時間信號，即實指數和複指數信號，連續時間和離散時間單位階梯和單位脈衝信號等。第二章還介紹了系統互聯的方塊圖表示，並討論了從因果性到線性、非時變性等幾個基本的系統性質。第三章就是在上述最後兩個性質的基礎上，再結合單位脈衝的移位性質，來建立離散時間線性非時變（LTI）系統的捲積和表示，以及連續時間非時變系統的捲積積分表示。在這裡，我們是採用從導出離散時間情況所得到的直觀認識，來導出並理解在連續時間情況下所對應的結論的。然後把問題轉到討論由線性常係數微分及差分方程所表徵的系統上來。在初步討論中複習了涉及解線性微分方程的一些基本方法（大多數學生對此都會有某些接觸），並對線性差分方程的類似解法作了討論。然而，第三章討論這些問題的主要著眼點不是在求解的具體方法上，因為稍後將要討論利用變換法來求解將更為方便，而我們的目的，首先是讓學生對於這個極為重要的系統具有某些了解，因為在以後的各章中將會經常遇到這類系統。討論中包括了加法器、係數相乘器和延遲單元（離散時間下）或積分器（連續時間下）等，以方塊圖形式來表示，由差

分方程和微分方程所描述的LTI系統，後續的章節再回到這一問題上，並藉著變換法來建立系統的串聯和並聯結構。這些系統的表示方法所包涵的內容不僅給學生提供了如何圖示一個系統的方法，並且還對LTI系統某些數學性質的含義（同一系統可用完全不同的結構來實現）給出了具體的例子。最後，第三章以簡短討論奇異函數（階梯、脈衝、脈衝偶等等）及其在描述和分析連續時間LTI系統中的作用作為結束。在討論中特別強調如何在捲積的意義下定義並解釋這些信號，例如在LTI系統下，對這些理想化信號的響應來理解這些奇異信號。

第四章完整地建立了連續時間信號和系統的傅立葉分析方法，而第五章則是以並行的方式來討論離散時間的情況。在這兩章的開頭，都包括了有關傅立葉分析歷史演變的一些情況，因而給學生就這些方法的應用領域有一些感性認識以及對傅立葉分析的某些數學方面有一個正確的理解。在這兩章的具體討論中，傅立葉分析在信號與系統研究中所引起的重要作用，都是從強調並說明如下兩個基本理由入手的：(1)相當廣泛的一類信號都可以表示成複指數信號的加權和或加權積分；(2)一個LTI系統對複指數輸入信號的響應就是同一個複指數信號乘以該系統的複數特徵值。因此，每一章都首先導出週期信號的傅立葉級數表示，然後把週期信號的週期任意趨大時求其傅立葉級數的極限來導出非週期信號的傅立葉變換表示。這種觀點強調了傅立葉級數和傅立葉變換之間的密切關係，這種關係將在後續的幾節中作進一步討論。這兩章都討論了傅立葉變換和傅立葉級數的很多重要性質，並且特別突出了捲積和調變性質。這兩個性質是稍後幾章中將要詳細討論的濾波，調變和取樣等問題的基礎。第四、五章的最後兩節是應用變換法來分析由微分和差分方程表徵的LTI系統，為了補充這些討論（以及後面拉氏變換與正變換的討論），書末列有附錄，包括有關部分分式展開法的討論。第四、五章都分別用了幾個例子來說明如何利用這一方法，可很容易地求得由微分和差分方程描述的LTI系統的響應。同時，我們還介紹了這類系統的串聯和並聯實現，並從這種系統的表示中引出和研究這些系統的基本構造單元，即一階和二階系統。

我們採用並行處理的辦法來處理這兩章傅立葉分析。具體說，在第五章的討論中，我們可以利用許多在第四章對連續時間情況下所獲得的概念和細節，

而到第五章末尾時，我們則著重於連續時間和離散時間傅立葉表示法的完全對稱的性質；同時，也用對比兩者的不同點來加深對各自特殊性質的認識。

第六、七章和八章分別討論濾波，調變和取樣問題。這些問題的討論不僅是爲了給學生介紹傅立葉的分析方法的某些重要應用方面，且爲了加深對頻域分析法的理解和直觀認識。第六章對連續時間和離散時間的濾波問題作了入門性介紹，其中包括討論了理想頻率選擇性濾波器；幾個由微分和差分方程描述的濾波器的例子；諸如汽車避震系統和巴特沃茲（Butterworth）濾波器等例子，簡述了在濾波器設計中遇到的許多定性和定量問題，以及特性之間的權衡和折衷問題。在本章習題中還討論了許多濾波的其他方面問題。

第七章討論的調變深度地討論了連續時間正弦幅度調變（AM），其直接利用調變性質來敘述調變在頻域中的效果入手的，並討論了如何能把原始調變信號恢復出來的原理。依此，在調變性質的基礎上討論了幾個另外的問題和應用，諸如：同步與非同步解調，可變中心頻率的頻率選擇性濾波器的實現，頻域劃分多工傳輸和單邊單調變等。在習題內還將涉及到更多的例子和應用。第七章還包括了三個其它的論題，第一是脈衝幅度調變和時域劃分多工傳輸，這是溝通第八章取樣問題的橋樑。第二是離散時間幅度調變，在連續時間幅度調變的基礎上很容易建立起離散時間幅度調變的概念，有關該方面的很多應用將在習題中給出。第三是頻率調變（FM）問題，這只是使讀者對非線性調變問題有一個初步的接觸。雖然FM系統的分析不像AM系統那樣來得直接，但是對FM的初步討論指出了如何能夠利用頻域的方法來獲得對FM信號和系統特性的實質有足夠的了解。

第八章取樣問題的處理主要著重在取樣定理及其含義上。然而，爲了正確地提出這一問題，採用了從討論連續時間信號的樣本來表示信號和利用內插來重建信號的一般概念著手。在利用頻域方法導得取樣定理以後，對欠取樣（指取樣過疏——譯者註）下的混淆現象，不但從頻域，也從時域的角度都作了直觀的解釋。取樣的一種很重要應用是在連續時間信號的離散時間處理上，本章在這一問題的闡述上花了一定的篇幅。對於連續時間取樣以及它的對偶，亦即時域取樣，也作了一番結論，然後把問題轉到離散時間信號的取樣上來。用完全並行與在連續時間下討論所採用的方式來建立離散時間取樣的基本結果，以及這些基本結果在抽取、內插和混合調變等問題中的應用。連續和離散時間取

樣的其它各種應用將在習題中提到。

第九、十章分別討論拉氏變換和正變換。雖然也簡要地討論了這兩種變換的單邊形式，以及其在非零初始條件下求解微分和差分方程中的應用，但是大部分篇幅都是集中在雙邊交換上。其內容包括：拉氏變換和正變換與傅立葉變換的關係；有理函數的變換與零極點概念；變換的收斂域與被變換的信號性質的關係；利用部分分式展開求反變換；根據零極圖，來對系統函數和頻率響應作幾何求值以及變換的基本性質等等。另外，在每一章還分別利用這兩種變換對LTI系統的系統函數的性質和應用進行了討論，其中包括由微分和差分方程表徵的系統其系統函數的確定，以及利用系統函數的代數關係來構成LTI系統的內部聯接等。最後，在第十章利用拉氏變換和正變換的方法，討論了把一個有理系統函數的連續時間系統映射到有理系統函數的離散時間系統的變換方法，其中列舉了三種這種變換的重要例子並研究了它們的用處和各種特性。

拉氏變換和正變換工具是研究第十一章反饋系統的基礎。本章以反饋系統的幾個重要應用及其性質著手，其中包括穩定一個不穩定的系統，設計追蹤系統和降低系統靈敏度等方面的應用。在隨後的幾節，將利用前面各章所獲得的方法來研究在連續時間和離散時間反饋系統中具有重要意義的三個問題，這些是：根軌跡分析法、奈奎斯特圖、奈奎斯特準則以及對數幅 / 相圖和穩定的反饋系統相位、增益容限概念。

信號與系統這一學科的內容極為豐富，有各種可能的途徑和方式來進行取材以形式該方面一門基本課程的內容。我們寫成的這本書就是為了給教師在組織該方面課程教學時有很大的靈活性。為使該科教師具有這樣的靈活性和最大的可用性，我們對大多數在信號與系統方面的基本課程中的核心內容都作了全面而深入的討論。為了達到此目的，就有必要略去另外一些內容，比如隨機信號和狀態空間方法的討論（常常也把這些內容放在信號與系統的第一門課中）。很多學校（包括M.I.T.）傳統上是不把這些內容包括在這種基礎性質的課程中的，而寧願放在專門研究這些問題的課程中去作更深入一些的討論。例如狀態空間方法是放在更為一般的輸入 / 多輸出和時變系統方面的課程中去處理，而且掌握了本書內容的堅實基礎之後，這種一般性處理是最合適的了。即使本書沒有包括狀態空間內容的介紹，講授教師如有需要還是可以很容易地把這一內容吸收到本書第二到第五章有關微分方程和差分方程的內容中去的。

適當地選用本書的第二、三、四和五章（各章有些內容可根據教師本人意見作些刪除）的有關內容，再從餘下的各章節中挑選一些問題就可以構成二、三年級程度的一學期課程的典型內容，例如，一種可能作法是從第六、七和八章中選取幾個基本問題，再帶上拉氏變換和正變換的內容，或許再加一點有關系統函數的概念在分析反饋系統中的應用等。還有其它的各種可能組成方式，其中包括把狀態空間的簡單介紹吸收進來，或者更多的側重點是面向連續時間系統（這時可把第五和十章以及第六、七、八、十一各章中的離散時間部分放在次要地位）等都是可能的。我們還發現，在討論傅立葉分析基本內容的同時，介紹一些第六、七和八章中的某些應用也是很有用的，這在本課程的早期階段幫助學生形成對這一學科的直觀了解和正確評價都是很有價值的。

除了上面提到的那些可能剪裁方式以外，這本書還可用作兩學期的線性系統課的基本教材。或者，在信號與系統第一門課中本書沒有被使用過的部分，再結合一些別的內容就可以形成一門高年級選修課的基礎。例如本書的不少內容都是可以和數位信號處理方面的課程相銜接的〔註〕。因此，使用在離散時間系統方面較深的一些內容作為數位信號處理課的入門，就可以形成一門大學高年級的課程。除此以外，也可以加上用狀態空間方法來描述和分析線性系統的內容而形成一門課。

在我們形成本書材料的過程中，一直有幸得到很多同事、學生和朋友們的幫助、建議和支持。構成本書核心部分的想法和觀點是作者在M.I.T.講授信號與系統課的十年時間中形成的，在這期間與我們一起共事的很多同事和學生對形成本書的原講稿的演變都給予了很大的影響。Jon Delatizky 和 Thomas Slezak 幫助我們設計了很多插圖，Hamid Nawab 和 Naveed Malik 作了與本書配套的習題解答，Carey Banks 和 David Rossi 幫助滙總了書末的參考文獻目錄，作者對此均表示衷心地感謝。另外，很多學生花費了不少時間為本書作了大量的清樣校對工作，對此也表示誠摯的謝意。

〔註〕例如 A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer "Digital signal Processing"

(Englewood Cliffs N. J. Prentice-Hall Inc, 1975)

譯 序

對於在資訊日益膨脹，計算機功能日新月異的今天，各種信號處理，系統控制的理論和方法，不斷推出；不斷更新，使得工程人員，甚至學者們都有應接不暇的感覺，應如何才能有效吸收，應用這許許多多的理論及方法？本書作者乃針對此問題而提出一解決之道：探討系統的基本概念和特性，熟悉系統分析和綜合技術的原理。

不管類比或數位的系統和信號，均離不開連續時間（continuous-time）或離散時間（discrete-time）的範疇，本書內容主要就是探討此兩者系統的基本概念和處理、分析技巧。尤其着重於線性（linear）及非時變性（time invariant）系統的討論，因大部份的實際系統均可經由分解、模組化的過程，再由線性、非時變性系統組合而成。此外，本書選載入系統分析的幾個主要工具：傅立葉轉換（Fourier transform），拉普拉斯轉換（Laplace transform）及Z-轉換（Z-transform），這些都是系統分析的基礎數學工具，可由此推導出系統在頻域（frequency domain）、時域（time domain），連續時間或離散時間的特性和系統響應（response），再加上濾波（filter）、調變（modulation）、取樣（sampling）等實際系統的例子和說明，用以加深讀者們對系統的觀念。

只要能深切瞭解和熟練運用這些技巧、觀念，則所有的新理論、方法，皆可穩站此基礎上從而瞭解、吸收和應用。

作者還強調一點，就是熟能生巧，故在此每一章都附設有相關的習題，希望讀者們能透過解答這些習題的訓練，加強對系統分析和信號處理的能力。

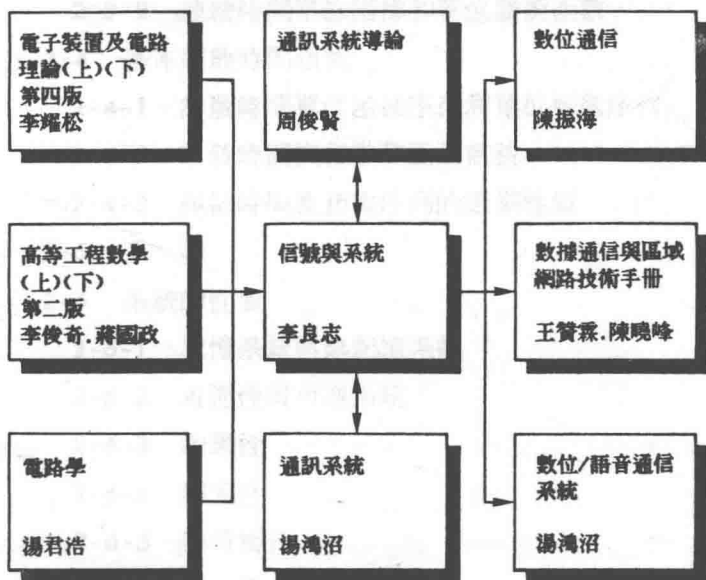
編輯部序

「系統編輯」是我們的編輯方針，我們所提供給您的，絕不只是一本書，而是關於這門學問的所有知識，它們由淺入深，循序漸進。

本書是由 Oppenheim、Willsky 和 Young 三位合著「Signal and System」編譯而成，內容主要講解連續時間及離散時間系統的特性及基本概念，並針對系統的線性、非時變性做一詳盡的敘述。此外還介紹三種對系統分析的數學工具—傅立葉轉換、拉普拉斯轉換及 Z 轉換，以及這些數學工具實際應用於系統分析的例子。適合大專程度，具有工程數學、電子電路基礎者研讀。

同時，為了使您能有系統且循序漸進研習相關方面的叢書，我們以流程圖方式，列出各有關圖書的閱讀順序，以減少您研習此門學問的摸索時間，並能對這門學問有完整的知識。若您在這方面有任何問題，歡迎來函連繫，我們將竭誠為您服務。

流 程 圖



目 錄

第一章 緒 論	1
第二章 信號與系統	7
2-0 引 言	8
2-1 信 號	8
2-2 自變量的變換	12
2-3 基本連續時間信號	18
2-3-1 連續時間複指數和正弦信號	18
2-3-2 連續時間單位階梯和單位脈衝函數	23
2-4 基本離散時間信號	28
2-4-1 離散時間單位階梯序列和單位脈衝序列	28
2-4-2 離散時間複指數和正弦信號	29
2-4-3 離散時間複指數序列的週期性質	34
2-5 系 統	38
2-6 系統的性質	42
2-6-1 記憶系統與無記憶系統	42
2-6-2 可逆性與可逆系統	43
2-6-3 因果性	44
2-6-4 穩定性	44
2-6-5 非時變性	46
2-6-6 線 性	47
2-7 小 結	49
習 題	49

第三章 線性非時變系統	75
3-0 引言	76
3-1 用脈衝函數表示信號	77
3-2 離散時間LTI系統：捲積和	82
3-3 連續時間LTI系統：捲積積分	94
3-4 線性非時變系統的性質	102
3-4-1 記憶與無記憶LTI系統	102
3-4-2 LTI系統的可逆性	103
3-4-3 LTI系統的因果性	105
3-4-4 LTI系統的穩定性	106
3-4-5 LTI系統的單位階梯響應	108
3-5 用微分和差分方程描述的系統	109
3-5-1 線性常係數微分方程	110
3-5-2 線性常係數差分方程	117
3-6 由微分方程和差分方程描述的LTI系統的方塊圖表示	121
3-6-1 用差分方程描述的LTI系統的表示	121
3-6-2 用微分方程描述的LTI系統的表示	127
3-7 奇異函數	130
3-8 小結	136
習題	136
第四章 連續時間信號與系統的傅立葉分析	179
4-0 引言	180
4-1 連續時間LTI系統對複指數信號的響應	186
4-2 週期信號的表示：連續時間傅立葉級數	188
4-2-1 成諧波關係的複指數線性組合	188
4-2-2 週期信號傅立葉級數表示中係數的確定	193
4-3 週期信號的傅立葉級數近似與傅立葉級數的收斂	200

4-4	非週期信號的表示：連續時間傅立葉變換	207
4-4-1	非週期信號傅立葉變換表示式的導出	207
4-4-2	傅立葉變換的收斂	211
4-4-3	連續時間傅立葉變換舉例	212
4-5	週期信號與連續時間傅立葉變換	219
4-5-1	傅立葉級數係數作為一個週期內信號的傅立葉變換	219
4-5-2	週期信號的傅立葉變換	221
4-6	連續時間傅立葉變換的性質	225
4-6-1	傅立葉變換線性性質	226
4-6-2	對稱性	226
4-6-3	時移性質	228
4-6-4	微分和積分性質	229
4-6-5	時間和頻率的尺度變換性質	231
4-6-6	對偶性	232
4-6-7	帕色沃 (Parseval) 定理	235
4-7	捲積性質	236
4-7-1	週期捲積	242
4-8	調變性質	243
4-9	傅立葉變換與傅立葉級數的性質及基本傅立葉變換對列表	248
4-10	連續時間傅立葉變換的極坐標表示	251
4-10-1	傅立葉變換的模與相位	251
4-10-2	伯特圖	255
4-11	用線性常係數微分方程表徵的系統的頻率響應	257
4-11-1	用微分方程表徵的LTI系統單位 ³ 衝響應和頻率響應的計算	257
4-11-2	串聯和並聯結構	260
4-12	一階與二階系統	264
4-12-1	一階系統	265