
神經網路 系統理論

焦李成 著

神經網路 系統理論

焦李成 著

儒林圖書公司 印行

版 權 所 有
翻 印 必 究

神經網路系統理論

著 者：焦 李 成

出 版 者：儒林圖書有限公司

地 址：台北市重慶南路一段 111 號

電 話：3118971-3 · 3144000

郵政劃撥：0106792-1

吉豐印刷廠有限公司承印

板橋市三民路二段居仁巷一弄 53 號

行政院新聞局局版台業字第 4336 號

1991 年 10 月初版

NT\$ 310 元

內容簡介

神經網路系統理論是近年來得到迅速發展的一個國際前衛研究領域，它的發展對計算機科學、人工智慧、認知科學、腦神經科學、數理科學、訊息科學、微電子學、自動控制與機器人、系統工程等領域都有重要影響。本書有系統地論述了神經網路系統的基本理論、方法，系統的綜合與應用及有關最新研究成果，主要內容有：神經元的MP模型及Hebb學習規則、動力系統的穩定性及其判別方法；前向網路、反向網路、自組織網路及隨機網路四個模式；神經網路的通有迭代模型、性質及其Systolic製作方法；新的神經網路模型及其時空結構功能及有關性能；神經網路的設計與綜合；神經網路理論的應用；神經網路計算機的基本結構與製作方法。

本書可作為理工科大學計算機、自動控制、信號與訊息處理、電路與系統、系統工程等專業博士生、碩士生及高年級大學生的教材，同時對有關領域的研究人員和工程技術人員有重要參考價值。

序 言

第一臺電子計算機問世，迄今已有近半個世紀的歷史。在這期間，不僅計算機本身幾經更新換代，其性能日益優越，而且計算技術也廣泛應用於各種資訊系統，能完成許多複雜處理。可以說，計算機的誕生和發展是本世紀科學技術最偉大的成就之一，它對推動科學、技術和社會的發展起到了難以估量的作用。

電子計算機是按馮·諾伊曼原理，用邏輯規則進行運算的，它有極強的算術和邏輯運算功能，現在的運算速度已可達每秒數億次，其結果的精確和可靠程度更是人工所無法企及的。但是，電子計算機的形象思維能力與人卻相去甚遠。人們對十分複雜的物體可以不加思考、一目了然地予以識別，但即使很簡單的物體，用先進的電子計算機來識別它卻也非常艱難。因此，要使設備具有較強的形象思維能力，看來按馮·諾伊曼原理的思路是行不通的，必須另辟蹊徑。

模擬人腦智慧特點和結構的人工神經網路的研究應運而生，且已有多年歷史。由於結構的複雜性，起始階段進展不快，並一度陷入低谷。但不少有識之士，在極其艱難的條件下，孜孜以求地研究，工作一直沒有中斷過，並在模型建立等理論方面取得了不少有效的成果。近年來，大型積體電路技術的發展。為其提供了製作的基礎和應用前景，在短短幾年裡，神經網路的研究異軍突起，進入了空前活躍的時期，成為訊息科學、腦神經科學和數理科學的“熱點”。

神經網路與以算術和邏輯運算、儲存與運算相分離、串列執行指令為基礎的馮·諾伊曼計算機迥然不同。它是一個非綫性動力學系統，並以分布式儲存和平行協同處理為特色。雖然單個神經元的結構和功能極其簡單和有限，但大量神經元構成的網路系統所能製作的行為卻是極其豐富多彩的。經過近幾年國際廣大科技工作者卓有成效的研

究，理論和實踐方面都取得了長足的進展。神經網路系統不僅在形象思維方面，而且在其它許多方面都表現出強大的生命力，特別為訊息科學界所矚目。

談論完全由神經網路構成具有較高知能的計算機，現在可能還有些為時尚早。因為人們對這樣一種極其復雜的非綫性動力學系統的認識還僅僅是初步的，許多難題還有待於突破。但是，將神經網路現有的成果應用於各種資訊系統已經成為現實，而且很可能由此開辟出一條嶄新的途徑。基於以上認識，我認為國內廣大科技工作者（特別是訊息科學領域的）應對神經網路予以關注。

焦李成先生是一位年輕的博士，在非綫性系統和超大型全集成系統方面做了許多研究工作，並有了可喜的成果。這年來，他又致力於神經網路系統的研究。《神經網路系統理論》一書就是他在悉心閱讀了大量有關著作的基礎上心有所得，並加以綜合分析和歸納，同時融入了他本人的研究成果。本書系統性較強，覆蓋面廣，分析較深入。它的出版對有志於神經網路系統研究的科技工作者和研究生是有裨益的。作為一門新興學科的著作，一定有許多待改進之處。希望本書的出版能夠對國內神經網路學科的發展起到一定的促進作用。願讀者與作者共同努力，將我國神經網路的研究推向前進。

保 錚 謹識

前 言

以非綫性大型平行分散式處理為主流的神經網路的研究在最近幾年取得了引人注目的進展，引起了包括計算機科學、人工智慧、認知科學、訊息科學、微電子學、自動控制與機器人、腦神經科學等學科與領域內的科學家的巨大熱情和廣泛興趣。人們普遍認為它將使電子科學和訊息科學等產生革命性的變革，並將促使以神經計算機為基礎的高技術群的誕生和發展。

神經網路理論突破了以傳統的綫性處理為基礎的數字電子計算機的局限，標示着人們開始考慮利用賴以生存的非綫性世界，探索和研究像人腦這樣的複雜巨系統。近十幾年來，耗散結構、孤粒子、自組織、協同學、超迴圈與微迴圈、奇怪吸引子與渾沌動力學等理論的問世和發展，使人們認識到非綫性是一切複雜性之源。正是由於非綫性作用，才孕育出大自然的萬千氣象、人類社會的風雲變幻和人類思維的錯綜差異。非綫性科學在過去 20 年間激勵了自然科學、工程技術與社會科學的幾乎全部學科的研究者，並向人們提出了劃時代的挑戰，同時也促進了神經網路研究的發展。

神經網路訊息處理系統雖然是以非綫性處理為基礎的，但目前所研究的只是非綫性系統的最簡單特徵。真正模擬人腦訊息處理方式的神經網路是一巨型非綫性動力學系統，它具有豐富的動力學複雜性，對此我們認識得還很不充分，有許多複雜現象還未認識到，很多重大的、根本性的問題，有些是空白，有些只有一個開端。特別是如何把腦科學的最新研究成果和 VLSI 技術（如電流模式 VLSI 技術）、光學技術及非綫性動力學系統理論結合起來，提出對應的神經網路模型（如適於 VLSI 製作的多維局域神經網路）及其製作方法與技術，還有許多工作要做，這也是開發智慧機器的基礎。

神經網路經過長期的大量研究，儘管取得了很多成果，但對於建立一套完整的理論體系來說，還是遠遠不夠的，況且，神經網路的研究日新月異，並涉及了如此眾多的研究領域。在這種情況下，本書面臨的形勢是複雜而困難的，這是作者所清楚明白的，但是作者還是鼓足勇氣將其出版。作者真誠地希望本書在大家的幫助下，不斷完善和提高。作為國內較早出版的神經網路的著作，作者認為首先應使本書包含較為全面的基本內容，同時也應反映這一新的研究領域的研究現狀和前沿課題以及一些有潛力的新思想、新方法、新技術（諸如 APNN、分維神經網路、神經網路的熵論、關聯穩定性與延時動力學、電流模式 VLSI 神經網路及神經最佳化處理器和系統等）。這就是本書撰寫的基本思想和出發點。非綫性思想是本書的思想基礎，它貫穿於本書的始終。本書包含了作者的研究成果和觀點。

本書的基本內容如下：

- 第一章為緒論，討論了神經網路研究的歷史和復興的動力。研究了神經網路的基本特徵，指出了有關前沿研究課題和研究的基本方法；

- 第二章簡要地提出了神經網路理論的研究基礎，包括神經元的 MP 模型及 Hebb 學習規則、動力系統的穩定性及其判別方法；

- 第三章至第六章主要討論神經網路模式及其性質。作者把它們歸納為前向網路、反饋網路、自組織網路和隨機網路四個模式。除熟知的感知器、BP、Adaline、Hopfield 網、ART、自組織特徵映射、認知機、BAM 模型外，還研究了交替投影神經網路、CPN、分維神經網路、Cauchy 機以及神經網路的熵測度理論等；

- 第七章給出了神經網路的通有迭代模型、性質及其 Systolic 製作方法，這是神經網路計算機很有前途的一種製作方法；

- 第八章則研究了神經網路的通有連續時間模型，提出了新的神經網路模型及其時空結構功能、延時非綫性動力學及結構攝動下的關聯穩定性等，其中主要為作者的一些研究成果；

· 第九章討論神經網路設計和綜合的四種基本方法，具體研究了四大類神經網路系統的動力學性質和綜合程式；

· 第十章和第十一章討論了神經網路理論的應用。前一章研究了神經最佳化計算和 CAM 中的偽解和偽穩定平衡點問題，並提出了一種與已有結果不同的神經最佳化方法。後一章則給出了神經網路專家系統的基本理論和製作方法，其中包含作者的一些研究成果；

· 第十二章研究了神經網路計算機的基本結構與製作方法。特別是 VLSI 製作的有關問題和途徑，提出了全集成神經最佳化處理器與系統、電流模式 VLSI 神經網路設計與製作等理論與方法，主要反映了作者在這方面的一些研究成果。

感謝保錚教授給予我熱情的關懷和悉心指導，並詳細地審閱了全書，邱關源教授也給予我熱情關懷和指導，借此機會表達我對保先生和邱先生由衷的敬意和感激。美國波士頓大學的 S. Grossberg 教授、加州伯克萊大學的 L. O. Chua 教授、加州工學院的 C. A. Mead 教授提供了許多寶貴的資料和有益的討論與建議，作者向他們表示誠摯的謝意。

謹以此書獻給我的父母和妻子。

焦李成

目 錄

序 言

前 言

第一章 緒論	(1)
1.1 神經網路的研究歷史	(1)
1.2 生物神經元模型	(7)
1.2.1 神經元的結構	(7)
1.2.2 神經元的功能	(8)
1.3 神經網路的基本特征和通有性質	(9)
1.3.1 神經網路的形式化描述	(10)
1.3.2 神經網路模型	(11)
1.3.3 神經網路的訊息處理能力	(13)
1.3.4 神經網路的互連結構形態	(16)
1.3.5 神經網路的分類與工作模式	(18)
1.3.6 神經網路的學習規則與分類	(21)
1.4 神經網路的研究方法與主要內容	(24)
1.4.1 神經網路的巨觀研究方法	(24)
1.4.2 神經網路未來發展方向與研究課題	(26)
第二章 神經網路理論基礎	(29)
2.1 MP 模型和 Hebb 學習規則	(29)
2.1.1 MP 模型	(29)
2.1.2 Hebb 學習規則	(30)
2.1.3 延時 MP 模型	(30)
2.1.4 改進的 MP 模型	(31)
2.2 動力系統的穩定性	(32)
2.2.1 穩定性分析的數學基礎	(32)
2.2.2 V 函數的性質的判別	(34)

2.2.3	定號函數的幾何解釋	(34)
2.2.4	穩定性的基本定義	(35)
2.3	穩定性的 Lyapunov 第二方法	(38)
第三章	神經網路模型 I：前向網路	(45)
3.1	綫性閾值單元	(45)
3.1.1	基本性質	(45)
3.1.2	用綫性閾值單元製作布爾函數	(46)
3.1.3	綫性可分性與學習	(46)
3.2	感知器	(47)
3.2.1	感知器學習演算法	(48)
3.2.2	多層感知器	(50)
3.2.3	梯度演算法	(53)
3.2.4	多層感知器學習的定量分析	(55)
3.3	BP 演算法 (反向傳播演算法)	(57)
3.4	前向網路的映射作用與容量分析	(62)
3.4.1	映射作用	(62)
3.4.2	前向網路的容量分析	(67)
3.5	自適應綫性元件 (Adaline)	(69)
3.5.1	綫性可分性	(70)
3.5.2	非綫性可分性——非綫性輸入函數	(71)
3.5.3	MADALINES 網路	(73)
3.5.4	Widrow-Hoff δ 規則	(75)
3.6	交替投影神經網路 (APNN)	(77)
3.6.1	凸集投影理論	(77)
3.6.2	交替投影神經網路	(78)
3.6.3	穩態收斂性	(82)
3.6.4	學習和訓練	(84)
3.6.5	多層 APNN	(85)
第四章	神經網路模型 I：反饋網路	(89)
4.1	離散的 Hopfield 神經網路	(90)
4.2	聯想記憶與神經計算	(97)
4.2.1	聯想記憶 (Associative Memory)	(98)

4.2.2	神經計算	(99)
4.3	連續時間 Hopfield 神經網路模型	(100)
4.3.1	非線性連續時間 Hopfield 神經網路	(100)
4.3.2	Hopfield 神經網路的設計與穩定性	(107)
4.4	高階關聯神經網路模型	(112)
4.5	聯想記憶體分析	(117)
4.6	雙向聯想記憶 (BAM)	(120)
4.6.1	離散 BAM (Bidirection Associative Memory)	(121)
4.6.2	連續和自適應 BAM 網路	(126)
4.6.3	高階自適應 BAM 網路	(127)
4.6.4	四種無導師聯想學習規則	(128)
4.6.5	競爭自適應 BAM 網路	(128)
4.6.6	隨機自適應 BAM 網路	(129)
4.7	高階自相關器和異相關器	(130)
4.7.1	一階自相關器	(131)
4.7.2	高階自相關器	(132)
4.7.3	一階異相關器	(133)
4.7.4	高階異相關器	(134)
4.7.5	一階 IBAM	(138)
4.7.6	高階 IBAM	(142)
第五章	自組織神經網路	(143)
5.1	自適應共振理論 (ART)	(143)
5.1.1	ART 的基本原理	(144)
5.1.2	ART 學習演算法	(148)
5.2	自組織特徵映射	(149)
5.3	CPN 模型	(152)
5.3.1	CPN 的訓練	(156)
5.3.2	CPN 的計算	(157)
5.4	神經認知機	(158)
第六章	隨機神經網路	(163)
6.1	模擬退火演算法	(163)
6.1.1	模擬退火演算法	(164)

6.1.2	改進的模擬退火法	(167)
6.1.3	SA 演算法的收斂性	(170)
6.2	Boltzmann 機	(172)
6.2.1	Boltzmann 機模型	(172)
6.2.2	能量函數	(173)
6.2.3	學習演算法	(175)
6.2.4	Boltzmann 機學習演算法推導	(178)
6.3	NN 的概率統計法	(180)
6.4	平行分布 Cauchy 機	(185)
6.5	神經網路的熵理論	(188)
6.5.1	NN 計算能量與熵	(189)
6.5.2	同步平行計算	(191)
6.5.3	異步串列計算	(192)
6.6	動力系統的分維學	(196)
6.6.1	Hausdorff 維數	(196)
6.6.2	分維的量度	(198)
6.7	分維神經網路	(201)
6.7.1	分維 NN 結構	(201)
6.7.2	訊息的儲存	(202)
第七章	神經網路的統一描述與 Systolic 陣列製作	(207)
7.1	Systolic 陣列	(207)
7.1.1	Systolic 陣列基本概念	(207)
7.1.2	Systolic 陣列結構	(209)
7.1.3	Systolic 實用演算法	(214)
7.1.4	Systolic 陣列的應用	(216)
7.2	波前陣列處理器	(219)
7.3	神經網路的通有迭代模型	(220)
7.3.1	回憶階段的通有公式	(221)
7.3.2	學習階段的通有公式	(223)
7.4	回歸 BP 和 HMM 的統一描述	(231)
7.4.1	回歸 BP 神經網路	(231)
7.4.2	隱元 Markov 模型 (HMM)	(233)

7.5	演算法到 Systolic 陣列/波前陣列結構的映射	(235)
7.6	通有迭代 ANN 模型的 Systolic 設計	(238)
7.6.1	回憶階段系統的環形 Systolic 設計	(239)
7.6.2	學習階段的環形 Systolic 設計	(242)
第八章	連續時間非綫性神經網路模型及其時空特徵	(253)
8.1	通有連續時間神經網路模型	(253)
8.1.1	通有 NN 模型	(253)
8.1.2	通有 NN 的穩定性	(255)
8.1.3	通有 NN 的計算能量函數	(260)
8.1.4	包含有不穩定子系統的大型神經網路穩定性分析	(261)
8.2	通有神經網路模型的關聯穩定性	(265)
8.2.1	有向圖	(265)
8.2.2	大型動力系統的結構與結構擾動	(268)
8.2.3	神經網路的關聯穩定性	(271)
8.3	通有神經網路的時空結構與延時動力學	(290)
8.3.1	通有神經網路模型的漸近行爲和延時穩定性	(291)
8.3.2	通有神經網路模型的延時關聯穩定性	(299)
第九章	神經網路的設計與綜合	(305)
9.1	聯想記憶設計要求	(305)
9.2	神經網路綜合的基本方法	(307)
9.2.1	外積法 (Outer Product Method - OPM)	(307)
9.2.2	投影學習規則	(309)
9.2.3	特征結構法 (Eigenstructure Method)	(311)
9.2.4	非對稱連接矩陣網路綜合	(314)
9.2.5	小結	(317)
9.3	Hopfield 型同步離散神經網路用於 AM 的綜合	(318)
9.3.1	神經網路模型	(318)
9.3.2	離散 Hopfield 型神經網路的穩定性分析	(319)
9.3.3	神經網路綜合	(326)
9.4	Hopfield 連續時間聯想記憶的綜合	(330)
9.4.1	Hopfield 模型	(330)
9.4.2	AM 設計	(331)

9.4.3	漸近穩定性	(331)
9.4.4	設計約束	(333)
9.4.5	綜合程式	(334)
9.5	超閉正立體上綫性神經網路的綜合	(337)
9.5.1	綜合問題	(337)
9.5.2	綜合策略	(338)
9.5.3	綜合過程	(338)
9.6	不連續神經網路系統的綜合	(343)
9.6.1	基本綜合問題	(344)
9.6.2	綜合策略	(344)
9.6.3	綜合過程	(345)
9.6.4	舉例	(351)
第十章	神經優化計算	(357)
10.1	Hopfield 模型理論分析	(357)
10.1.1	Hopfield 模型的特征向量表示	(358)
10.1.2	CAM 性質	(359)
10.2	TSP 問題	(362)
10.2.1	TSP 問題描述	(362)
10.2.2	連接矩陣特征值與網路的動力學分析	(364)
10.3	神經優化計算的一種新方法	(373)
10.3.1	神經網路廣義收斂定理	(373)
10.3.2	神經優化計算的新演算法	(377)
第十一章	神經網路專家系統	(381)
11.1	專家系統的發展與現狀	(381)
11.2	神經網路專家系統基本原理與結構	(384)
11.2.1	神經網路專家系統的基本原理	(384)
11.2.2	神經網路專家系統的基本結構	(384)
11.3	基於神經網路系統的知識表示、獲取與推理	(386)
11.3.1	神經網路及其矩陣表示	(386)
11.3.2	知識表示的神經網路方法	(387)
11.3.3	基於神經網路系統的知識獲取	(389)
11.3.4	基於神經網路系統的平行推理	(392)

11.4	組合神經網路專家系統的製作	(394)
11.5	小結	(396)
第十二章	神經網路計算機及其 VLSI 製作	(399)
12.1	神經網路計算機	(399)
12.1.1	神經網路計算機的分類	(399)
12.1.2	直接基於硬體的神經網路計算機製作	(401)
12.1.3	基於現代數字計算機的神經網路計算機製作	(402)
12.2	神經網路的數字 VLSI 製作	(406)
12.3	神經網路的電壓模式模擬 VLSI 製作	(410)
12.3.1	模擬神經網路電路基本原理	(411)
12.3.2	MOSFET - C 神經網路	(412)
12.3.3	開關電容神經網路	(414)
12.4	神經網路的電流模式模擬 VLSI 設計與製作	(416)
12.4.1	電流模式 VLSI 設計	(416)
12.4.2	電流模式 VLSI 神經網路設計	(418)
12.4.3	高階 OTA - C 神經元模型	(421)
12.4.4	電流模式 VLSI 神經網路的自動調諧	(422)
12.5	全集成模擬神經網路優化處理器	(423)
12.5.1	全集成優化處理器的提出	(423)
12.5.2	非綫性規劃神經網路計算機	(424)
12.5.3	全集成綫性規劃神經網路計算機	(426)
12.5.4	二次規劃神經網路模擬電路	(427)
12.5.5	大型非綫性規劃的全集成神經網路模擬	(429)
展 望	(431)
參考文獻	(433)

第一章

緒 論

1.1 神經網路研究的歷史

神經網路的研究已有近 30 年的歷史，但它的發展是不平衡的，它的興衰與“人工智慧走什麼路”這一爭議問題有關。與之有關的神經科學研究（大腦功能的生理學及心理學研究、神經元的電生理研究等）在 40 年代已有不少工作，早在 1943 年，心理學家 McCulloch 和數學家 Pitts 合作提出形式神經元的數學模型（稱之為 MP 模型），從此開創了神經科學理論研究的時代。MP 模型用邏輯的數學工具研究客觀世界的事件在形式神經網路中的表述，1944 年，Hebb 提出了改變神經元連接強度的 Hebb 規則，它們至今仍在各種神經網路模型中起着重要的作用，而作為人工智慧的網路系統的研究則是 50 年代末 60 年代初開始的；1957 年 Rosenblatt 首次引進了感知器概念（Perceptron），它由門限值性神經元組成，試圖模擬動物和人腦的感知和學習能力；1962 年 Widrow 提出了自適應線性元件（Adaline），它是連續取值的線性網路，主要用於自適應系統，這與當時佔主導地位的以順序離散符號推理為基本特徵的 AI 途徑完全不同，因而引起了不少人的興趣，同時也引起了很大的爭議。人工智慧的創始人之一 Minsky 和 Paper 潛心數年，對以感知器為代表的網路系統的功能及其局