



全国高技术重点图书

神经网络 模式识别系统理论

● 黄德双 著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

神经网络模式识别系统理论

黄德双 著

電子工業出版社

内 容 简 介

神经网络模式识别系统理论和技术,是一门引人入胜而又崭新的学科,近年来,受到了普遍的关注与重视。自从对脑机理研究的半个多世纪以来,人们几乎对人的视觉系统的工作机制了解得最为透彻,所以,人们把神经网络在模式识别中的应用看作是神经网络理论应用最成功的一个方面。为此,本书系统地阐述了神经网络模式识别的理论、方法和应用,包括作者近年来的最新研究成果和见解。主要内容包括神经网络模式特征提取;Madaline 网络、多层感知器网络、径向基函数网络、ARTMAP 等有导师学习分类网络;自组织特征映射、自适应共振理论(1,2,3)等无导师学习分类网络;学习矢量量化、学习子空间和隐马尔可夫模型等自监督学习网络;Hopfield 网络、Hamming 网络和 BSB 模型等自联想与异联想分类网络,以及模糊神经网络分类器等。此外,书中还包括前馈网络和学习子空间分类器的机理研究。

本书是国内第一本系统介绍神经网络模式识别系统理论和技术著作,可作为从事计算机、信息处理、电子工程、自动控制、雷达系统、人工智能等专业和所有涉及模式分析和机器智能领域的工程科技人员的参考书目,也可作为高年级本科生、研究生的选修教材。

神经网络模式识别系统理论

章德双 著

责任编辑 焦桐顺

电子工业出版社 出版

北京市海淀区万寿路 173 信箱 (100036)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

顺义县天竺颖华印刷厂印刷

开本: 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 21.75 字数: 520 千字

1996 年 5 月第一版 1996 年 5 月北京第一次印刷

印数: 2000 册 定价: 36.00 元

ISBN 7 - 5053 - 3266 - X/TP · 1214

附:《全国高技术重点图书》

出版指导委员会名单

主任:朱丽兰

副主任:刘 杲

卢鸣谷

委员:(以姓氏笔划为序)

王大中	清华大学核能技术设计研究院院长
王为珍	山东科技出版社社长
牛田佳	人民邮电出版社社长
王守武	中国科学院半导体所研究员 中科院院士
刘 仁	国防工业出版社总编 副编审
刘 杲	新闻出版署副署长
卢鸣谷	中国版协科技出版工作委员会主任委员
叶培大	北京邮电学院名誉院长 教授
朱丽兰	国家科委常务副主任
孙宝寅	清华大学出版社副社长 副教授
师昌绪	中国科学院技术科学部主任
任新民	航空航天工业部总工程师
	中国宇航学会理事长 中科院院士
杨牧之	新闻出版署图书局局长
杨嘉墀	航空航天工业部五院院长 研究员 中科院院士
陈芳允	国防科工委科技委顾问 中科院院士
陈能宽	中国工程物理研究院科技委高级科学顾问
	国防科工委科技委兼职副主任 中科院院士
罗见龙	中国版协科技出版工作委员会副主任委员 编审
周炳琨	清华大学电子系教授 中科院院士
欧阳莲	广东科技出版社社长 总编辑
张钰珍	国家科委高技术司副司长
张效祥	中国计算机协会理事长 研究员 中科院院士
赵忠贤	中国科学院物理研究所研究员 中科院院士
顾孝诚	北京大学生物系主任
谈德颜	科学出版社总编 编审
龚 刚	上海科技出版社社长
梁祥丰	电子工业出版社社长 编审

总干事:罗见龙 梁祥丰

序

自从地球出现生命,并逐渐进化到人类以来,已经经历了漫长的世纪。当人类意识到自己的存在,并惊叹自己的智慧和劳动杰作时,对智力本质的探讨就从来没有停止过。当前,智力的本质、宇宙的演化、物质的构成、生命的起源被认为是自然科学最奥妙的四大问题,也是人类探索客观世界中,最具挑战性的四大问题。数千年来,人类创造了巨大的物质文明,但人类对自身具有的智能的理解,仍然是十分肤浅的,对人脑的研究表明,人脑是由 10^{11} 以上的神经元组成的极为复杂的系统,信息在这样一个复杂的系统中的处理、传输、存储并最终被认知的过程,被认为是探索智力本质的关键问题。

人类具有对外界信息的模式进行识别的能力。模式识别能力是人类智能的一个重要组成部分。人类通过眼睛、耳朵等感觉器官接受外界信息,这些外界信息通过神经纤维传入人的大脑皮层,并得到分阶段的、不同层次的处理。研究表明,这种信息处理过程,不仅仅是一个感知的过程(它使我们感觉到外部世界的存在),也是一个认知的过程(它使我们理解与识别外部世界)。因此,研究模式识别,是理解人类智能的本质的重要途径,其中,对视觉与听觉的研究发展最快。

自从计算机问世以来,让机器具有模式识别能力一直是计算机科学家们努力的方向,对视觉与听觉信息处理的研究产生了计算机视觉,计算机语音识别等新兴的学科,由于受当前计算机体系结构的影响,这些研究越来越脱离人脑在实现模式信息处理中特有的神经网络体系结构,还有不少人认为,只要在计算理论的层次上弄清模式信息处理过程,用什么样的体系结构去实现它,对智能本质的理解是无关紧要的。然而,这种看法正在受到越来越多的研究者的怀疑,一方面,从计算理论的层次上去描述模式识别碰到了越来越大的困难,另一方面,近年来,对神经网络的研究表明,神经网络是一个高度并行的,非线性的,具有很高冗余度的系统,这种系统结构使知识的表达与存储,使模式信息处理过程,都与传统的方法有很大差别;它具有的高度非线性性,使我们能表达一些至少是目前尚无法用计算理论表达清楚的外部世界模型及信息处理的过程;同时,神经网络所具有的自学习、自组织能力,使我们能在与外部世界的交互作用下,实现无法用当前的计算理论表达清楚的功能。所有这些,使得近年来对神经网络与计算神经科学的研究越来越受到重视,所谓“人工神经网络”,就是计算机科学工作者,企图用计算机或专用芯片局部模拟人脑神经网络结构,以实现智能信息处理。当前,用人工神经网络来实现模式识别,是人工神经网络研究的重点。

黄德双博士是我国最早研究神经网络模式识别理论的年轻学者之一,他具有很宽的知识面和较强的事业心。《神经网络模式识别系统理论》一书就是他多年悉心研究的成果之一,该书系统阐述了神经网络模式识别的基本概念和基本模型,特别在外监督前馈网络分类机理、推广能力,径向基概率神经网络分类器和自监督学习子空间模式识别方法方面,是作

者对神经网络模式识别理论的贡献。本书内容丰富，系统性较强，覆盖面广，章节安排合理，是近年来该领域系统阐述神经网络模式识别系统理论的教科书和参考书，我相信它的出版对我国神经网络模式识别理论的发展，会起到促进作用。希望作者和读者共同努力，将我国模式分析和机器智能的研究推向深入。

中国科学院自动化所 马颂德
一九九六年三月·北京

前 言

模式识别也称为图形识别, 简单地说, 就是把一种研究对象, 根据它的某些特征进行识别并分类的一门综合性新兴技术。它所研究的对象, 如文字、声音、图象、产品等, 概括起来统称为模式。模式数据可以是对象的定量或定性的描述, 如医学诊断、航空摄像分类、市场趋势分析、图书分类、银河定位、人口统计、股票分析、指纹识别、现金交换、化学成份分析和军事判决等。当识别的对象为模糊现象时就称为模糊模式识别, 如“黑与白”、“多与少”、“大与小”、“胖与瘦”等。如何使计算机具有人脑识别与判断的能力? 就成为科技界竞相研究的热门课题。但现在的计算机是建立在二值逻辑基础之上的, 对任何命题, 非 0 即 1 (即非假即真)。因此, 仅仅这两个值是不能真实地反映千变万化活动的人脑思维的。

神经网络理论的研究, 已经成为各国政府、科研机构、生产和开发厂家十分重视的发展方向; 目前, 国际上与神经网络有关的著名刊物至少有 18 种, 而且很多非神经网络刊物都定期开辟专辑讨论神经网络; 每年世界上至少举行一次有关神经网络及其应用方面的国际会议; 我国所实施的有关自然科学基金重大项目也是将基于神经网络的智能信号处理作为研究的重要内容。自从 1990 年开始, 我国每年都要举办一次神经网络学术大会 (国内或国际), 由国内十五个一级学会组织的学术会议的宗旨是“携手探智能, 联盟攻大关”。

模式识别理论是信号处理的重要内容之一, 它已形成独立的学科, 具有勃勃的生机。特别是目前正在兴起的神经网络研究热潮给模式识别领域增添了新的活力、带来了新的希望。所以, 深入开展这一工作的研究具有普遍重要意义, 它不但会给这一学科本身带来新的变革, 并有可能使神经网络理论取得实质性的进展。

模式识别理论与神经网络理论是相互渗透、互相映射的。人们最初在研究模式识别问题时, 也是从智能信息处理的角度入手, 这是因为模式识别与人的视觉有着千丝万缕的联系。人的视觉神经系统是人脑神经中枢最丰富的神经分布区域之一, 它是人与外界事物交流的“窗口”, 担负着“繁重”的“辨识”与“分类”任务。目前, 对视觉神经系统研究的结论普遍认为, 人类的视觉是基于运动、颜色和形状来对外界物体进行分类的, 这些特征是由大脑不同区域分工合作来实现的。然而, 这是一种简化的模型, 人的视觉神经系统究竟是如何来进行模式识别, 大脑各部分是如何协作共同完成“繁重的分类与辨识”任务, 目前还不完全清楚。所以, 如果揭示了人的视觉模式信息处理的机制, 那么, 基于视觉模型的神经网络识别系统将因此大受裨益, 并会得到长足的发展。

目前, 以视觉神经系统为中心的神经网络理论的研究正取得迅猛的发展, 这一领域所取得的些许进步, 都会给模式识别系统带来新的希望。所以, 人们普遍认为, 神经网络理论在模式识别中的成功应用是神经网络应用最成功的一个方面。

神经网络用于模式识别的网络模型主要包括: ① 有导师 (外监督) 学习网络: MAD-LINES 网络、多层感知器网络 (MLPN)、径向基函数网络 (RBFN)、函数链网络 (FLN)

和高阶网络 (HON) 或 $\Sigma\Pi$ 网络等; ② 无导师 (自组织) 学习网络: 自适应共振 (ART) 网络、自组织特征映射 (SOFM) 和 Boltzmann 机等; ③ 自监督学习网络: Hopfield 网络、学习子空间 (LSM)、学习矢量量化 (LVQ) 和概率神经网络 (PNN) 等; ④ 混合学习网络: 神经认知机和反传网络等。这些网络模型都已成功地应用在模式识别各个领域。

本书就是使用神经网络这一新的工具来讨论模式识别问题。围绕这一问题本书的内容如下:

● 第一章概述了神经网络模式识别新技术的历史、现状与发展, 以及人工神经网络的一般特征和神经网络模式识别若干基本模型; 讨论了神经网络模式识别与传统的模式识别方法的关系。最后定量地给出了神经网络模式识别系统中的几个基本识别统计量的定义。

● 第二章研究了模式识别前待分类模式样本的特征提取问题。讨论了付里叶变换、梅林变换、子波变换、高阶矩或多谱分析和神经网络主要分量分析等特征提取方法。

● 第三章全面地分析了神经网络自适应模式识别中的基本问题。讨论基于外监督分类的一类前馈网络和自组织网络等自适应模式识别问题。

● 第四章研究了一类前馈网络用于模式识别的学习方法。对基于 LMS 的反向传播算法和基于 RLS 的反向传播算法的学习速度和性能进行了比较, 然后, 提出了 RBFN 网络中的权值和高斯形状参数的联合自适应学习方法。

● 第五章对前馈网络的内部机理做了深入的研究。从几何, 概率和代数三个角度分别研究了一类前馈网络用于监督分类的机理, 并给出有关重要结论。

● 第六章研究了基于模式样本统计分布的一类概率神经网络模式分类方法, 特别提出了一种径向基概率神经网络模式分类器模型。

● 第七章研究了学习矢量量化 (LVQ) 模式分类的一般方法, 并讨论了它们与神经网络结合构成的分类器的特点。

● 第八章提出了三种无序且计算要求低的自组织学习子空间模式识别方法, 即最小模学习子空间法、前后向平均学习子空间法、平均检错学习子空间法。讨论了它们的基本原理和基本特性。

● 第九章研究和讨论了学习子空间模式识别的统计特性问题, 如子空间的收敛性、稳健性和推广能力等。

● 第十章研究了具有时间处理能力的时间神经网络模式分类问题。讨论了串行和并行时延的两种确定性时间网络分类器, 以及以 HMM 模型为主的随机性时间网络分类器。

● 第十一章研究了 Hopfield 网络、双向联想记忆网络和 BSB 模型用于自联想记忆与异联想记忆的模式识别问题。研究了 Hamming 网络的用于离散模式的分类机理, 并推广了 Hamming 网络、Hopfield 网络、BAM 网络和感知器网络用于分类的几种组合结构。

● 第十二章研究了自组织模式分类的基本原理。讨论了 Kohonen 的自组织特征映射 (SOFM) 网络, Carpenter 和 Grossberg 的自适应共振 (ART1, ART2 等) 网络以及 ARTMAP 网络, 用于模式识别的机理。

● 第十三章研究了模糊神经网络分类器。包括有导师学习的模糊极小极大分类器, 模糊 ARTMAP 分类器, 以及模糊竞争分类器。

此外, 本书的最大特点是, 将所有神经网络分类器的学习方法或测试过程, 以算法形

式列表给出, 仅供读者参考。

本书的研究工作是在我的博士学位论文《雷达目标一维像识别技术的研究》的基础上, 经两年多时间的进一步完善与充实完成的。在北京理工大学“电子学与通讯”第一期博士后流动站期间, 得到了“中国博士后科学基金”的资助, 并在中国科学院自动化所国家模式识别重点实验室两次得到客座研究员基金的支持, 进一步充实了本书的内容。考虑到本书的内容是“神经网络模式识别系统理论”, 所以, 为了反映神经网络模式识别的最新进展, 本书也吸收了国际部分专家的研究成果, 并将自己在这些领域的心得体会也一并收入, 但因时间关系, 加上数据来源不足, 所以, 自第十章以后的分类算法, 未经具体实验数据的检验。

95年7月, 进入中科院自动化所“自动控制”博士后流动站做第二期博士后的前六个月, 作者又对全书内容进行了仔细的斟酌和删改。

囿于本书的篇幅, 一些领域, 如“神经认知机分类器”、“波尔兹曼机分类器”、“神经树分类器”等未能涉及。由于时间仓促, 再加上作者水平有限, 书中的词句未能仔细推敲, 故错漏地方一定不少, 敬请有关专家和读者批评指正。

本书的出版首先要感谢我攻读博士期间的导师, 中国科学院院士、西安电子科技大学保铮教授曾给予的关心与精心指导; 感谢北京理工大学博士后流动站专家组导师中国工程院院士毛二可教授和韩月秋教授的关心、指导与帮助, 韩教授在百忙中还抽时间审阅了部分章节。特别值得一提的是, 如果没有他们给我创造的宽松的学习环境, 要完成本书是不可能的。另外, 还要感谢我的第二站导师, 中科院自动化所国家模式识别重点实验室主任马颂德研究员的大力支持和帮助。马老师给我创造了优越的工作条件, 使我在半年的时间内, 进一步完善和充实了书稿。1994年5月, 美籍华人包约翰教授来自动化所讲学期间, 作者曾向他提交了本书的详细摘要, 与他进行了深入的讨论, 对他的指点与帮助表示真挚的感谢。感谢IEEE神经网络专辑主编Robert J. Marks I教授和《Pattern Recognition》杂志主编Blair V. Mossman教授的指点 and 帮助。

本书部分得到中国博士后科学基金的资助, 在此表示感谢!

最后, 还要感谢我的父母和妻子对我工作的理解和全力支持!

黄德双

1995年12月于北京

符号说明

$\subset$	包含于
$\supset$	包含
$\cap$	交集
$\cup$	并集
$\bar{U}$	补集
$\approx$	逼近于
ψ	空集
$\odot$	两个矩阵的点积或两个模糊集合的合成
$\oplus$	模糊子集的概率和或子空间的直和
$\ominus$	模糊子集的有界差
$\vee$	模糊集中的取大运算
$\wedge$	模糊集中的取小运算
$\in$	属于
$\notin$	不属于
$\Rightarrow$	蕴含
$\Leftrightarrow$	等价于
$\forall$	对于任意的
j	虚数单位
$\sup$	上确界
$\lim$	取极限
$\max$	取最大值
$\min$	取最小值
sep	矩阵间的分离度
$(\cdot)^T$	T 表示矩阵或矢量的转置
$(\cdot)^*$	$*$ 表示矩阵或矢量的共轭
$(\cdot)^H$	H 表示矩阵或矢量的共轭转置
A^{-1}	表示矩阵 A 的逆
A^+	表示矩阵 A 的 Moore — Penrose 广义逆
I	单位矩阵
$R(A)$	由矩阵 A 的所有列向量所张成的子空间
$N(A)$	矩阵 A 的零空间
$\text{tr}(A)$	矩阵 A 的迹
$\text{rank}(A)$	矩阵 A 的秩

$\lambda(A)$	矩阵 A 的所有特征值的全体
$\sigma(A)$	矩阵 A 的所有奇异值的全体
$\ x\ _p$	矢量 x 的 p 范数 ($p=2$ 时为 Euclid 范数)
$\ A\ _2$	矩阵 A 的 2 范数 (或谱范数)
$\ A\ _F$	矩阵 A 的 Frobenius 范数
n	模式样本维数
R	实数域或一般的论域
R^n	n 维实欧几里德空间
$R^{n \times n}$	n 维实欧几里德空间中的所有 $n \times n$ 阶矩阵
$L^2(R)$	实数域平方可积空间
$\varphi(x)$	尺度函数
$\psi(x)$	子波函数
ω_i	第 i 个模式类别集合
c	模式类别或聚类类别的个数
$x^{(i)}$	第 i 类模式样本矢量
$x_j^{(i)}$	第 i 类模式样本矢量对应的第 j 个分量
$N^{(i)}$	第 i 类模式样本数
$R_x(\cdot, \cdot)$	模式样本 x 的三重相关函数
$B(\cdot, \cdot)$	双谱函数
$m^{(i)}$	第 i 类模式分布的均值矢量
$\sigma^{(i)}$	第 i 类模式分布的方差
$sk^{(i)}$	第 i 类模式分布的偏奇
$ku^{(i)}$	第 i 类模式分布的峰态
M_{pq}	$(p+q)$ 阶原点矩
$\bar{M}_{pq}$	$(p+q)$ 阶中心矩
A_{nm}	第 (n, m) 阶 Zernik 矩
S_i	总体散布矩阵
S_b	类间散布矩阵
S_w	类内散布矩阵
$S_R(\cdot, \cdot)$	点积 (相关)
$S_C(\cdot, \cdot)$	方向余弦
$d_{H_1}(\cdot, \cdot)$	汉明距离的第一种定义
$d_{H_2}(\cdot, \cdot)$	汉明距离的第二种定义
$S_T(\cdot, \cdot)$	Tanimoto 测度
$d_M(\cdot, \cdot)$	Minkowski 距离测度
$d_w(\cdot, \cdot)$	加权距离
$\text{dist}(S_1, S_2)$	子空间 S_1 与 S_2 间的距离
$P^{(i)}$	第 i 个子空间对应的投影矩阵

$L_k^{(i)}$	在 k 时刻,第 i 个模式类别对应的子空间
A_k	第 k 时刻的变换矩阵
$\bar{A}_k$	至 k 时刻的变换矩阵
$\hat{R}$	模式类相关矩阵的估计
$R(A)$	矩阵 A 的列空间
$R^\perp(A)$	$R(A)$ 的补空间
$N^\perp(A)$	$N(A)$ 的补空间
$\lambda_i(A)$	矩阵 A 的第 i 个特征谱(值)
δ_j	误差代价函数相对第 j 个节点权值的负梯度
L	网络层数(不包括输入层)
N_l	第 l 层神经元(节点)数目
$x_i(t)$	对于模式 t ,输入矢量 $\mathbf{x}(t)$ 的第 i 个分量
$x_i^{(l)}(t)$	l 层中第 i 个神经元节点对于模式 t 的输出
$y_i^{(l)}(t)$	l 层中第 i 个神经元节点对于模式 t 所接收到上一层的输入总和
$w_{ij}^{(l)}(t)$	l 层中第 i 个神经元节点对于模式 t 连接权矢量 $\mathbf{w}_i^{(l)}(t)$ 的第 j 个分量
$d_i^{(l)}(t)$	l 层中第 i 个神经元节点对于模式 t 的总的期望输入
$\theta_i^{(l)}(t)$	l 层中第 i 个神经元节点对于模式 t 的偏置
$\epsilon_i^{(l)}(t)$	l 层中第 i 个神经元节点对于模式 t 的误差信号
$J(\cdot)$	误差加权代价函数
$\mathbf{g}(\cdot)$	卡尔曼增益
$P(\cdot)$	逆相关矩阵
P_n	网络整体性能
$K(\cdot)$	核函数
α_i	核函数第 i 个分量对应的形状参数
λ	遗忘因子
$P(\omega)$	先验概率
$P(\omega/\mathbf{x})$	后验概率
$p(\mathbf{x}/\omega)$	类条件概率密度
P_c	网络存储容量
G_c	网络推广能力
D_i	前馈网络吸引域
μ_k	模糊隶属度



黄德双 1964年生，祖籍安徽肥东,工学博士,副教授。1986年7月毕业于合肥解放军电子工程学院，获雷达工程专业学士学位,1989年4月毕业于长沙解放军国防科技大学，获通信与电子系统专业硕士学位,1993年3月毕业于西安电子科技大学，获信号、电路与系统专业博士学位,1993年7月-1995年7月在北京理工大学“电子学与通讯”博士后流动站做第一站博士后研究,1995年7月起在中国科学院自动化所国家模式识别重点实验室“自动控制”博士后流动站做第二站博士后研究。曾参加“七五”和“八五”国防预研项目和自然科学基金。主要从事信号处理、模式识别、神经网络和计算机视觉方面的研究工作。在国内外学术期刊和会议发表论文40余篇。

目 录

第一章 神经网络与模式识别	1
§ 1.1 神经网络模式识别研究的历史	2
§ 1.2 神经网络的一般特征及基本模型	3
§ 1.3 神经网络模式识别与统计模式识别的关系	8
§ 1.4 最小误差分类准则和识别统计量	9
1.4.1 最小误差分类准则	9
1.4.2 模式识别中的识别统计量	10
第二章 神经网络与模式特征提取	12
§ 2.1 模式的预处理	13
2.1.1 消除稳态分量	13
2.1.2 模式样本的归一化处理	14
2.1.3 模式样本的平滑与分块	14
§ 2.2 模式的变换域特征	16
2.2.1 付里叶变换	17
2.2.2 梅林变换	18
2.2.3 子波变换	18
2.2.4 多谱分析与高阶矩	20
§ 2.3 模式样本的降维处理	23
2.3.1 Fisher 线性判别法	24
2.3.2 K-L 展开法	26
§ 2.4 神经网络信息变换与特征提取	27
2.4.1 主要分量分析	27
2.4.2 模式样本的非线性变换	28
§ 2.5 模式的相似性度量	29
§ 2.6 评 述	30
第三章 神经网络自适应模式识别	31
§ 3.1 线性感知器	31
3.1.1 线性感知器的决策边界	31
3.1.2 线性感知器算法	32
§ 3.2 Adaline 和 Madaline 网络	35
3.2.1 单层自适应线性单元	35
3.2.2 Madaline 网络	36

§ 3.3	函数链神经网络	37
§ 3.4	外监督学习神经网络分类器	39
3.4.1	最小均方误差准则	39
3.4.2	互熵函数准则	39
3.4.3	分类质量因素准则	40
3.4.4	最小分类误差准则	40
§ 3.5	自组织神经网络分类器	41
3.5.1	自组织分类网络	41
3.5.2	自组织神经网络四种无导师学习方法	42
§ 3.6	评 述	43
第四章	前馈网络模式识别方法研究	45
§ 4.1	改进的反向传播学习算法	46
§ 4.2	基于单层感知器网络的递推最小二乘算法的基本原理	48
4.2.1	基本思想	49
4.2.2	递推最小二乘算法	49
§ 4.3	径向基函数网络递推最小二乘学习算法	51
§ 4.4	多层感知器网络 RLS-BP 学习算法	53
4.4.1	多层感知器 RLS-BP 学习算法	54
4.4.2	两层感知器 RLS-BP 学习算法	54
§ 4.5	径向基函数形状参数 α 的自适应学习	55
§ 4.6	目标—维像识别的计算机模拟结果	56
4.6.1	RLS-BP 学习算法训练的 MLPN 用于解决“异或”问题	57
4.6.2	RBFN 用于雷达目标—维象的分类	57
§ 4.7	评 述	68
第五章	前馈网络分类机理的研究	70
§ 5.1	前馈网络用于分类的几何机理	71
5.1.1	超平面分割的几何机理	71
5.1.2	输入层至隐层映射的定性解释	73
§ 5.2	超曲面分割网络	74
5.2.1	前馈网络的输入输出映射	75
5.2.2	一般的超曲面分割网络	76
§ 5.3	前馈网络用于分类的概率机理	78
5.3.1	径向基函数网络用于分类的概率机理	79
5.3.2	多层感知器网络用于分类的概率机理	91
§ 5.4	前馈网络用于分类的代数机理	91
5.4.1	Fisher 线性变换与线性前馈网络	91
5.4.2	前馈网络的代数分类机理	97
§ 5.5	前馈网络模式分类器的全局优化问题	105
5.5.1	全局最小的条件	105

5.5.2	推广至非奇异矩阵求逆	108
5.5.3	两层前馈网络与单层前馈网络间的关系	109
§ 5.6	前馈网络的推广能力	111
5.6.1	前馈网络外监督信号的选择	111
5.6.2	前馈网络的推广能力和抗扰性	114
§ 5.7	评述	117
第六章	核函数概率神经网络模式识别	119
§ 6.1	基于概率的分类器	120
§ 6.2	概率神经网络分类器	121
6.2.1	Parzen 窗核函数概率估计	121
6.2.2	概率神经网络结构	121
6.2.3	概率神经网络分类规则	123
6.2.4	径向基函数网络与概率神经网络的比较	123
§ 6.3	基于散度函数的典型模板样本迭代选择方法	124
6.3.1	散度函数的定义	124
6.3.2	模板样本的迭代选择方法	125
§ 6.4	典型样本的主成分提取方法	127
6.4.1	特征值分解法(EDM)	127
6.4.2	正交迭代法(OIM)	127
6.4.3	学习子空间法(LSM)	128
§ 6.5	径向基概率神经网络模式分类器	130
6.5.1	网络的结构与特点	130
6.5.2	径向基概率神经网络模型的计算特性	133
6.5.3	计算复杂度与训练速度比较	134
6.5.4	实验结果分析	134
§ 6.6	评述	137
第七章	学习矢量量化模式识别	138
§ 7.1	近邻法模式分类器	138
7.1.1	最近邻法	138
7.1.2	K-近邻法	139
7.1.3	近邻法模式分类器的进一步考虑	139
§ 7.2	矢量量化	140
7.2.1	基本原理	140
7.2.2	LBG 迭代算法	141
7.2.3	密度估计	143
§ 7.3	学习矢量量化模式分类器	143
7.3.1	LVQ 的终止准则	143
7.3.2	LVQ 算法	144
7.3.3	改进的 LVQ 算法	147

7.3.4	LVQ 算法的初始条件	148
§ 7.4	神经网络学习矢量量化模式分类器	149
§ 7.5	评 述	152
第八章	自监督学习子空间模式识别	153
§ 8.1	模式子空间的形成	154
8.1.1	子空间的基本性质	154
8.1.2	子空间的形成	155
8.1.3	子空间维数的选择	156
§ 8.2	学习子空间方法的一般概念	157
8.2.1	子空间旋转的几何解释	157
8.2.2	子空间分类规则	159
8.2.3	子空间的重复学习	159
8.2.4	学习子空间方法的基本要求	159
§ 8.3	最小模学习子空间法	160
8.3.1	基本思想	160
8.3.2	最小模学习子空间算法	161
§ 8.4	检错平均学习子空间法	162
8.4.1	基本思想	163
8.4.2	检错平均学习子空间算法	163
§ 8.5	前后向平滑学习子空间法	164
8.5.1	基本思想	164
8.5.2	前后向平滑学习子空间算法	165
§ 8.6	计算机模拟结果	168
§ 8.7	评 述	174
第九章	自监督学习子空间模式识别方法的统计特性分析	175
§ 9.1	子空间的距离测度与正交迭代收敛定理	175
9.1.1	子空间的夹角与距离	175
9.1.2	子空间正交迭代收敛定理	177
§ 9.2	自监督学习子空间模式识别的统计特性分析	178
9.2.1	学习子空间变换矩阵的收敛解	178
9.2.2	最小模学习子空间法	180
9.2.3	检错平均学习法	180
9.2.4	前后向平滑学习子空间法	181
§ 9.3	模式特征子空间的扰动特性分析	182
9.3.1	学习子空间的特征谱	182
9.3.2	模式特征子空间的扰动特性分析	184
§ 9.4	学习子空间方法的推广能力	186
§ 9.5	评 述	187
第十章	时间神经网络模式识别	188