

基于细胞神经网络的 非线性时滞系统自适应控制

张建华 吴学礼 李杨 甄然 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

基于细胞神经网络的非线性 时滞系统自适应控制

张建华 吴学礼 李杨 甄然 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

在控制领域的研究中,非线性系统的控制问题一直是国内外学者研究的热点。针对无法得到精确数学模型的复杂非线性系统,神经网络因具有强大的逼近能力的特点,为解决复杂非线性系统的控制问题提供了新的思路和方法。本书以细胞神经网络为基础,通过线性矩阵不等式技术、Backstepping 方法、自适应控制方法、Lyapunov - Krasovskii 泛函等研究工具,对神经网络的稳定性、混沌神经网络的同步、非线性时滞系统的辨识与控制问题进行了较为深入的阐述。

本书适合从事非线性控制理论的研究人员使用和参考,也可作为相关院校控制科学与工程专业教师和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

基于细胞神经网络的非线性时滞系统自适应控制/张
建华等著. —北京:国防工业出版社,2012. 1
ISBN 978-7-118-07899-2

I. ①基... II. ①张... III. ①非线性系统(自动
化):时滞系统—研究 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 274972 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 8 字数 142 千字

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3500 册 定价 22.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

在现代工业生产过程中,为了实现高品质、大批量生产,构造系统通常具有非线性、时变性、不可预知的参数和其他复杂特性,而只用线性系统的方法往往不能全面描述系统的动态特性。基于神经网络的感应技术,凭借其固有的逼近能力,被认为是解决复杂动态系统建模与控制的有效方法。时滞现象也是普遍存在于实际工业生产过程中的,这使得系统的控制问题变得具有挑战性。本书介绍了通过神经网络为蓝本处理时滞系统在控制领域中存在的相关问题,特别是针对时滞细胞神经网络的稳定性、同步和非线性系统辨识与控制,提供了有效的解决方案。

本书首先介绍了带有时滞的细胞神经网络的稳定性问题,根据 Lyapunov 稳定性理论给出全局渐近稳定和指数稳定的稳定性新判据。稳定性判据分为时滞相关和时滞无关两种,在时滞比较小的情况下,时滞相关的稳定性判据通常更有意义。稳定性判据以 LMI 的形式给出,可通过软件实现。其次,针对带有混沌现象的时滞细胞神经网络,介绍了混沌同步控制问题。在伴有外界扰动的情况下,设计了基于滑模控制方法的自适应混沌同步控制器;针对带有脉冲的一致混沌神经网络,设计脉冲同步控制器。

本书还介绍了多输入多输出非线性系统的神经网络辨识与控制。针对一般性的非线性时滞系统,基于 Lyapunov 稳定性理论,应用滑模控制的相关思想设计间接自适应控制。利用神经网络对非线性系统进行辨识,神经网络的权值系数通过自适应算法调整,利用辨识出的模型,设计相应的控制器使系统状态能够跟踪上预先设定的轨迹。进一步应用动态补偿的方法设计神经网络间接自适应控制器,利用神经网络对非线性系统进行辨识,根据辨识出的模型设计控制器,在设计控制器时加入适当的动态补偿,使系统状态能够跟踪上预先设定好的轨迹。

针对具有三角结构的单输入单输出非线性时滞系统,首先基于返步迭代策略,介绍了神经网络直接自适应控制器,并通过 Lyapunov 稳定性理论证明了系

统的输出和期望轨迹的误差闭环系统一致有界稳定。进一步通过基于返步迭代策略,设计了神经网络间接自适应控制器,针对系统进行神经网络辨识,并在辨识模型的基础上,加入动态补偿的方法设计控制策略,通过 Lyapunov 稳定性理论证明了系统的输出和期望轨迹的误差闭环系统一致有界稳定。

具体安排如下:

第1章对基于细胞神经网络的非线性时滞系统自适应控制的研究背景及意义做了介绍。

第2章对时滞神经网络进行分析,提出基于 LMI 的时滞相关和时滞无关的全局渐近稳定和指数稳定新判据,以及针对带有时滞的混沌神经网络,研究了混沌神经网络的自适应同步和脉冲同步。

第3章对神经网络控制方法进行分析,通过神经网络对非线性系统进行逼近,针对三角结构仿射非线性系统设计神经网络自适应控制器。

第4章针对一般多输入多输出非线性系统,分别设计基于滑模控制和动态补偿方法的神经网络自适应控制器。

第5章针对三角结构非仿射非线性时滞系统,分别设计了神经网络直接和间接自适应控制器。

在本书出版之际,我由衷地感谢我的导师——燕山大学吴学礼教授、李惠光教授,以及对我的课题进行指导过的西英格兰大学朱全民教授,燕山大学关新平教授、华长春教授,河北科技大学梁咏春教授,河北师范大学杜文霞博士,他们的学识和对当今控制理论的精辟分析,给了我巨大的启迪,为我的学习与科研奠定了基础。他们深刻而独特的思想方法,严谨的治学态度与孜孜不倦的追求精神,深深影响着我,将使我终身受益。最后,要深深感谢我的父母、妻子及家人,他们是我前进的动力。

本书研究内容得到了国家自然科学基金(60843004)、河北省自然科学基金(F2007000637)、河北科技大学学术著作出版基金的资助。

本书只是作者在神经网络控制研究领域的初步成果,加之作者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,敬请广大读者批评指正。

张建华

2011年10月于石家庄

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景及意义	1
1.2 非线性控制	2
1.3 神经网络控制	3
1.4 自适应控制	5
1.5 鲁棒控制	7
第 2 章 神经网络的稳定性分析与同步控制	9
2.1 引言	9
2.2 系统描述和预备知识	10
2.3 稳定性分析	12
2.3.1 全局渐近稳定	13
2.3.2 指数稳定	17
2.4 混沌神经网络同步控制	21
2.4.1 混沌神经网络自适应同步	21
2.4.2 脉冲混沌神经网络同步	30
2.5 仿真实验	34
2.6 本章小结	45
第 3 章 非线性系统神经网络自适应控制	46
3.1 引言	46
3.2 一阶系统自适应控制	47
3.3 纯反馈系统自适应控制	50
3.4 严格反馈系统自适应控制	58
3.5 仿真实验	66
3.6 本章小结	70

第 4 章 多输入多输出非线性系统神经网络控制	71
4.1 引言.....	71
4.2 系统描述和预备知识.....	72
4.3 基于滑模控制的辨识与控制.....	73
4.4 基于动态补偿的辨识与控制.....	80
4.5 仿真研究.....	86
4.6 本章小结.....	93
第 5 章 三角结构非线性系统神经网络控制	94
5.1 引言.....	94
5.2 系统描述与假设.....	94
5.3 神经网络直接自适应控制.....	96
5.4 神经网络间接自适应控制	104
5.5 仿真实验	115
5.6 本章小结	117
参考文献	118

第1章 绪 论

1.1 背景及意义

目前为止,在对机械、电子电路、化工和其他工业学科的控制过程中^[1],通常认为控制对象在整个控制过程或某一阶段是线性的。将控制对象认为是线性系统之后,通过相对成熟的线性系统的设计方法来实现辨识与控制。如今,线性系统的分析与设计方法已经有了一套相对成熟的理论体系^[2],可以按照理想的控制目标进行控制。控制器设计的本质还是在数学模型基础上进行的,而模型的精确程度直接影响控制的精度,特别是对控制精度有较高要求的领域,如航天器的飞行轨迹和控制姿态系统、电力系统和机器人的控制。而现代控制理论的目的就是为了能够更加精确地进行控制^[3,4]。

在工业过程和现在世界中,几乎所有的系统都是非线性系统,线性系统只是在一定范围内对非线性系统的近似描述,纯粹的线性系统是没有的。随着科技的迅猛发展,工业控制也对控制精度有了越来越高的要求,而将非线性系统看成是线性的,并在线性系统的基础上进行分析和控制显然无法达到精确控制的目的。此外,工业过程还伴随着不确定性、时变性以及时滞等因素,于是产生了鲁棒控制^[5]、自适应控制^[6,7]以及时滞系统^[8,9]等相关学科。

时滞普遍存在于工业系统的众多领域中,在工业控制过程中,时滞存在于多个环节当中。由于工业过程本身的物理化学特性存在时间的延迟,控制环节中传感器的工作原理、电子元器件的影响存在时间的延迟,检测信号、控制信号的传输产生时间的延迟,因此,时滞是普遍存在的,而时滞的存在可使本身稳定的系统变得不稳定,导致系统性能下降,从而使系统变得无法正常运行。因此,在对被控系统性能分析时,应当充分考虑时滞对系统的影响。目前对时滞系统的研究已经有了一定结果^[10]。

因此,对非线性系统特别是对非线性时滞系统的研究还是很有必要的,也是很有意义的。研究非线性时滞系统的难点在于缺乏合适的工具去处理非线性部分,特别是带有时滞的非线性部分,同时,系统的模型在工业过程中也难以获取。针对上述问题,一系列控制方法应运而生,如神经网络控制^[11]、自适应

控制、模糊控制、滑模变结构控制等。对非线性时滞系统的研究一方面完善了控制理论，另一方面也对工业过程提供了所需方法和理论依据，对工业过程控制起到至关重要的作用。

1.2 非线性控制

非线性控制系统的理论与应用研究近 20 年来取得了可喜的进展，特别是以微分几何为工具发展起来的精确线性化方法受到了普遍的重视。通过利用微分方程和差分方程等基本工具研究非线性系统状态、输入输出变量间的依赖关系，系统地建立了非线性控制系统能控、能观及能检测的充分或必要条件，特别是全局状态精确线性化及输入输出精确线性化方法的发展，使复杂的非线性系统综合问题在适当的非线性状态和反馈变换下转化为简单的线性系统综合问题。它与传统的利用泰勒展开进行局部线性化近似不同，在线性化过程中没有忽略掉任何高阶非线性项，因此这种线性化不仅精确，而且是在全局意义下的，即线性化对变换有定义的整个区域都适用。

自 1892 年李亚谱诺夫 (Lyapunov) 建立了稳定性概念的理论以及维纳在 20 世纪 40 年代创立控制论以来，自动控制理论经历了两个主要的发展阶段：经典控制理论与现代控制理论。20 世纪 50 年代前后的控制理论被认为是经典控制理论，其主要研究集中在线性定常系统；而对于非线性系统，则采用描述函数分析和相平面分析法。到 20 世纪 60 年代末至 70 年代初，现代控制理论得到了发展。现代控制理论着重于解决多变量系统的优化控制问题，主要研究方法是利用状态方程来描述系统，并且把系统中的各个变量均取为时间函数的时域分析法。

这一时期，自动控制理论得到了巨大的发展和应用，但随着工业的发展，自动控制理论的局限性慢慢显露出来，主要是因为其控制器的设计依赖于被控系统的数学模型，即要求精确描述传递函数或状态空间表达式。但是在工业控制中一般很难得到精确的数学模型，这使得基于精确数学模型的控制设计方法在应用上受到很大的限制。特别在对于处理被控系统的非线性、复杂性和不确定性等方面，由于很难得到其精确的数学模型，造成应用效果很差，在自适应性和鲁棒性方面存在难以弥补的严重缺陷，使应用受到很大的限制。

随着科学技术的飞速发展，现代工业系统具有高度的复杂性^[12,13]，系统的结构和参数具有高维性、时变性、高度非线性、强耦合性等；系统及其外部环境具有许多未知的不确定性；由于系统或系统所处环境复杂，精确数学模型更

难以建立,控制品质很难达到要求。自从 1965 年付京孙教授提出智能控制的概念以来,智能控制理论和技术得到了很大的发展。出现了模糊控制、人工神经网络控制、专家控制和遗传算法控制等多种先进控制方法^[14,15],并在许多领域得到广泛的应用^[16-18],为解决那些用传统方法难以解决的复杂系统^[19-21]的控制问题提供了有效的理论、方法和实际经验。

Backstepping 方法在处理非线性控制问题方面具有独特的优越性,近年来引起了众多学者的极大关注。Backstepping 的基本设计思想是将复杂的非线性系统分解成不超过系统阶数的子系统,然后单独设计每个子系统的部分 Lyapunov 函数,在保证子系统具有一定收敛性的基础上获得子系统的虚拟控制律,在下一个子系统的设计中,将上一个子系统的虚拟控制律作为这个子系统的跟踪目标。相似于上个子系统的设计,获得该子系统的虚拟控制律;以此类推,最终获得整个闭环系统的实际控制律,且结合 Lyapunov 稳定性分析方法来保证闭环系统的收敛性。Backstepping 可用来设计满足匹配条件的三角结构单输入单输出非线性系统的控制方案。Backstepping 设计方法之所以受到国内外学者的极大关注,主要原因为该方法取消了系统不确定性满足匹配条件的约束,从而解决了相对复杂的非线性系统的控制问题。在现实世界中,存在大量非线性系统具有或者可以经过微分同胚变换成严格反馈等规范型;该方法为复杂非线性系统的 Lyapunov 函数设计提供了较为简单的结构化、系统化方法,解决了一直以来具有严格反馈等结构的非线性系统稳定性分析和控制器设计的难题。自适应 Backstepping 设计方法发展的初级阶段,要求系统不确定性能够线性参数化。神经网络与模糊系统等智能控制技术的不断发展,很好地取消了自适应 Backstepping 设计所需的该约束条件,从而使得 Backstepping 技术获得了很大的发展空间。特别是神经网络和自适应技术的引入,极大地推广了 Backstepping 方法的应用。

1.3 神经网络控制

神经网络,或称为人工神经网络,源于对大脑工作机制的研究。它由具有适应性的简单单元广泛并行互连而成,旨在模拟大脑处理信息的某些机理与机制,实现某个方面的功能。随着科学技术的飞速发展,作为一门涉及脑科学、数理科学、信息科学、智能控制等领域的交叉学科,神经网络被日益广泛地应用于最优控制、组合优化、模式识别、联想记忆、聚类分析、平行计算、信号处理等领域,成为实际应用中的热门课题和很多理论研究者关注的焦点^[22]。

神经网络是一种模仿动物神经网络行为特征,进行分布式并行信息处理算法的数学模型。这种网络依靠系统的复杂程度,通过调整内部大量节点之间相互连接的关系,从而达到处理信息的目的。人工神经网络具有自学习和自适应的能力,可以通过预先提供的一批相互对应的输入输出数据,分析掌握两者之间潜在的规律,最终根据这些规律,用新的输入数据来推算输出结果,这种学习分析的过程被称为“训练”。

神经网络的研究可追溯到 19 世纪末期,其发展历史可分为四个时期:第一个时期为启蒙时期,开始于 1890 年美国著名心理学家 W.James 关于人脑结构与功能的研究,结束于 1969 年 Minsky 和 Papert 出版的《感知器》(Perceptrons)一书;第二时期为低潮时期,开始于 1969 年,结束于 1982 年 J. J. Hopfield 发表的著名文章《神经网络和物理系统》(Neural network and Physical system);第三个时期为复兴时期,开始于 J. J. Hopfield 的突破性研究论文,结束于 1986 年 D.E.Rumelhart 和 J. L. McClelland 领导的研究小组编写出版的《并行分布式处理》(Parallel Distributed Processing)一书;第四个时期为高潮时期,以 1987 年首届国际人工神经网络学术会议为开端,迅速在全世界范围内掀起人工神经网络应用热潮,至今势头不衰。

Hopfield 于 1982 年和 1984 年在美国科学院刊上提出了一种仿人脑神经网络新模型,即著名的 Hopfield 模型。Hopfield 提出了网络模型实现的电子线路,并成功地运用于著名的旅行推销商(TSP)问题的求解,开拓了神经网络用于联想记忆和优化计算的新方向,神经网络的理论与应用研究从此走上了健康科学的发展道路。1986 年, D. W. Tank 等人提出了一种具有高度互联性和并行性的神经网络结构 (HT 模型),通过引入能量函数的概念使具体的模拟网络与优化问题直接对应,成功地实现了在微秒至纳秒数量级的时间内完成线性优化问题的求解。ANN 实质上是一个由大量神经元相互连接而成的、高度非线性的动力学网络系统,具有很强的自适应、自学习、自组织能力,以及巨量并行性和容错性,因而,它具备许多传统的信号和信息处理技术所不能及的优势。例如,可以执行目前最佳线性信号处理技术所无法完成的复杂函数逼近和信号滤波检测,可以完成特征空间高度非线性区域的模式识别等任务。随着研究的逐步深入,神经网络已广泛应用于通信、雷达、生物医学工程、语音和图像处理、模式识别和自动控制等领域。

人工神经网络是基于对人脑组织结构、活动机制的初步认识提出的一种新型信息处理体系。通过模拟脑神经系统的组织结构以及某些活动机理,人工神经网络可呈现出人脑的许多特征,并具有人脑的一些基本功能。

神经网络的特征主要有结构特征和能力特征。结构特征主要是指并行处理、分布式存储与容错性。人工神经网络是由大量简单处理元件相互连接构成的高度并行的非线性系统，具有大规模并行性处理特征。虽然每个处理单元的功能十分简单，但大量简单处理单元的并行活动使网络呈现出丰富的功能并具有较快的速度。

能力特征主要指的是自学习、自组织与自适应性。自适应性是指一个系统能改变自身的性能以适应环境变化的能力，它是神经网络的一个重要特征。自适应性包含自学习与自组织两层含义。神经网络的自学习是指当外界环境发生变化时，经过一段时间的训练或感知，神经网络能通过自动调整网络结构参数，使得对于给定输入能产生期望的输出，训练是神经网络学习的途径，因此经常将学习与训练两个词混用。神经网络能在外部刺激下按一定规则调整神经元之间的突触连接，逐渐构建起神经网络，这一构建过程称为网络的自组织。神经网络的自组织能力与自适应性相关，自适应性是通过自组织实现的。

人工神经网络是借鉴于生物神经网络而发展出来的新型智能信息处理系统，由于其结构上仿照了人脑的生物神经系统，因而其功能上也具有了某种智能特点。人工神经网络的基本功能是有联想记忆、非线性映射、分类与识别、优化计算、知识处理。

1.4 自适应控制

自适应控制的研究对象是具有一定程度不确定性的系统，这里的“不确定性”是指描述被控对象及其环境的数学模型不是完全确定的，其中包含一些未知因素和随机因素。

任何一个实际系统都具有不同程度的不确定性，这些不确定性有时表现在系统内部，有时表现在系统的外部。从系统内部来讲，描述被控对象的数学模型的结构和参数，设计者事先并不一定能准确知道。作为外部环境对系统的影响，可以等效地用许多扰动来表示。这些扰动通常是不可预测的。此外，还有一些测量时产生的不确定因素进入系统。面对这些客观存在的各式各样的不确定性，如何设计适当的控制作用，使得某一指定的性能指标达到并保持最优或者近似最优，这就是自适应控制所要研究解决的问题。

自适应控制与常规的反馈控制和最优控制一样，也是一种基于数学模型的控制方法，所不同的只是自适应控制所依据的关于模型和扰动的先验知识比较

少，需要在系统的运行过程中去不断提取有关模型的信息，使模型逐步完善。具体地说，可以依据对象的输入输出数据，不断地辨识模型参数，这个过程称为系统的在线辨识。随着生产过程的不断进行，通过在线辨识，模型会越来越准确，越来越接近于实际。既然模型在不断地改进，显然，基于这种模型综合出来的控制作用也将随之不断地改进。在这个意义下，控制系统具有一定的适应能力。例如，当系统在设计阶段时，由于对象特性的初始信息比较缺乏，系统在刚开始投入运行时可能性能不理想，但是只要经过一段时间的运行，通过在线辨识和控制以后，控制系统逐渐适应，最终将自身调整到一个满意的工作状态。再如，某些控制对象，其特性可能在运行过程中要发生较大的变化，但通过在线辨识和改变控制器参数，系统也能逐渐适应。

常规的反馈控制系统对于系统内部特性的变化和外部扰动的影响都具有一定的抑制能力，但是由于控制器参数是固定的，所以当系统内部特性变化或者外部扰动的变化幅度很大时，系统的性能常常会大幅度下降，甚至是不稳定。所以对那些对象特性或扰动特性变化范围很大，同时又要求经常保持高性能指标的一类系统，采取自适应控制是合适的。但是同时也应当指出，自适应控制比常规反馈控制要复杂得多，成本也高得多，因此只是在用常规反馈达不到所期望的性能时，才会考虑采用。

自适应控制是现代控制中热门的研究领域之一。自适应控制(Adaptive Control)，本应译为适应控制，在我国习惯称为自适应控制，目前为止在控制界还没有一个精确的定义，大致可以描述为：通过输入和输出的信息，实时地掌握被控对象和系统误差的动态特性，并根据其变化情况及时调节控制量，使系统维持最优或满足一定要求。

自适应控制按照不同的准则可分为不同的类别。按被控对象的性质可分为确定性自适应和随机自适应控制；按照控制器参数的获取方式，可分为直接自适应控制和间接自适应控制；按照结构的不同可分为前馈自适应控制和反馈自适应控制。另外，也有把自适应控制分为自校正控制、模型参考自适应控制和其他自适应控制。

自适应控制起源于航空领域，在 20 世纪 50 年代初期有人提出了自适应的概念，但真正对自适应控制诞生有重要影响的人是美国麻省理工学院的教授 Whitaker。利用参考模型的期望特性与实际特性控制飞机驾驶达到理想的状态。

近年来，自适应控制理论的研究，从结构到算法都取得了一定的成绩^[23-25]，主要针对系统的稳定性、收敛性和鲁棒性，借助于 Lyapunov 稳定性理论和波波夫超稳定性理论。

1.5 鲁棒控制

任何数学模型都只能是实际中物理系统的一个近似，模型误差的存在必然会降低控制系统的性能。鲁棒控制就是为了定量地考察这种由于系统的模型误差对控制系统性能的影响。其基本思想是假定对象的模型属于一个集合，而这个集合把模型误差引起的系统参数不确定性包括其中。系统的鲁棒性就是指控制系统的某些特性对于集合中的每一个对象是否都是成立的，例如，集合中的每一个对象都是稳定的，称该系统为鲁棒稳定的；如果集合中的每一个对象都具有指定的性能指标，就称该系统具有指定的鲁棒性指标。

对不确定性的描述通常可以分为结构化和非结构化两种，前者一般指系统存在有限个不确定参数，主要是描述参数不确定性，而后者则相反，系统的不确定性很难归结为系统某个或某些参数的摄动，一般用来描述为建模动态(也称为动态不确定性)。一般而言，结构化不确定性提供的信息更具体，因而保守性更小。实际上，结构化不确定性模型可以嵌入到非结构化模型中。

系统鲁棒性的研究最早可追溯到研究微分方程解对初值和参数具有连续性的工作。这就是要求解在给定区间的任意小变化可以由参数的充分小变化来保证。这种无穷小分析的思想在不同领域引发了不同的概念与结论。在控制系统的研究中，人们感兴趣的常常不是一个过程对参数变化的灵敏性，而是系统的某个性质或某个指标对参数变化的敏感程度。通常最基本的是系统的稳定性在参数变化下保持的可能性。就常系数线性系统的稳定性而言，系统的稳定性参数常在参数空间中由一组不等式加以描述，这样稳定参数常组成一个开集，这就使系统的稳定性相对参数总能保持无穷小扰动。近年来，鲁棒控制发展迅速^[26-28]，同时与众多学科交叉在一起，出现很多新的方向^[29,30]。

稳定性概念的出现有悠久的历史，早在 17 世纪就出现过托里斯利原理，即物理仅受重力作用，当重心位置最低时，其平衡是稳定的，反之是不稳定的。对应于稳定运动的严格性定义却没有建立。稳定性概念也早被拉普拉斯、拉格朗日、马克斯威尔、汤姆逊和德特、庞加莱等采用过。

既然稳定性很重要，那么就需要给出系统稳定与否的判定定理。这些定理都是基于系统的数学模型，根据数学模型的形式，经过一定的计算就能够得出稳定与否的结论，这些定理中比较常用的有：劳斯判据、赫尔维茨判据、李亚谱诺夫三个定理。这些稳定性的判别方法分别适合于不同的数学模型，前两者主要是通过判断系统的特征值是否小于零来判定系统是否稳定，后者主要是通

过考察系统能量是否衰减来判定稳定性。

当然，系统的稳定性只是对系统的一个基本要求，一个令人满意的控制系统必须还要满足许多别的指标，如过渡时间、超调量、稳态误差、调节时间等。一个好的系统往往是这些方面综合考虑的结果。

第2章 神经网络的稳定性 分析与同步控制

2.1 引言

细胞神经网络广泛应用在模式识别和信号处理等众多方面,使得对细胞神经网络的研究成为热点。在实际的系统中,时滞是普遍存在的,而时滞的存在常常对系统的性能影响很大,这就使得在研究过程中不可忽视时滞的存在。为了更好地用于实际应用,时滞细胞神经网络的稳定性问题成为研究的热点。

时滞细胞神经网络的稳定引起了数学界和控制界的普遍关注^[31-33],通过构造 Lyapunov 泛函,讨论了系统的稳定性问题,并给出了稳定的充分条件。其中包括时滞细胞神经网络的时滞相关的稳定性判据^[34-36]和时滞无关的稳定性判据^[37,38]。时滞相关的稳定性判据是指稳定性判据中包含时滞,主要是针对时滞的大小对稳定性有影响的系统,即时滞过大系统是不稳定的;而时滞无关的稳定性判据是针对时滞的大小对系统的稳定性没有影响的系统。在系统时滞比较小的情况下,时滞相关的稳定性判据会更有意义。按照稳定的不同可以分为指数稳定^[39]和全局渐近稳定^[40],针对系统参数的不同也有对鲁棒稳定^[41,42]的相关研究。稳定性判据大都根据 Lyapunov 稳定性理论和一些处理矩阵不等式的相关技巧^[43],同时针对时滞也有一些更深入的处理方法^[44,45]。

由于时滞神经网络的动力学表现,在一定情况下会出现混沌现象,近年来,混沌同步在保密通信和信息科学等方面的潜在应用,使得关于混沌神经网络同步的研究成为了热点。目前对混沌同步算法的相关研究很多,大多是对 Lorenz 混沌系统的同步^[46,47]和反同步^[48,49]以及超混沌系统的同步研究,也有一些对混沌神经网络的同步控制研究^[50,51]。在同步过程中,有引入随机参数^[52],也有利用滑模控制^[53],特别是在系统参数未知的情况下应用自适应方法进行同步控制^[54,55]。另外,系统存在脉冲的影响,也有脉冲同步的相关研究^[56,57],其中主要是针对 Lorenz 混沌系统的脉冲同步^[58]和混沌神经网络的脉冲同步研究^[59,60]。

细胞神经网络的稳定性和同步控制的相关研究已经较为成熟，但如何最大限度地针对细胞神经网络的特点进行研究仍然具有很多研究空间。本章将研究时滞细胞神经网络的全局渐近稳定性和同步控制问题。基于 Lyapunov 稳定性理论，构造 Lyapunov 泛函并通过基于细胞神经网络特点的矩阵不等式放缩的一些技巧，得出时滞相关和时滞无关的全局渐近稳定和指数稳定性新判据，判据以 LMI 的形式给出，可以很容易通过软件实现。针对带有参数未知的混沌神经网络和参数已知的带有脉冲的混沌神经网络，分别给出自适应同步和脉冲同步的新算法，并通过 Lyapunov 稳定理论证明了同步方法的有效性。

2.2 系统描述和预备知识

常时滞细胞神经网络模型可以通过下面的等式进行描述：

$$\dot{y}(t) = -Cy(t) + Af(y(t)) + Bf(y(t-\tau)) + S \quad (2-1)$$

或是

$$\dot{y}_i(t) = -c_i y_i(t) + \sum_{j=1}^n a_{ij} f_j(y_j(t)) + \sum_{j=1}^n b_{ij} f_j(y_j(t-\tau)) + s_i \quad (2-2)$$

式中：

$$y(\cdot) = [y_1(\cdot), y_2(\cdot), \dots, y_n(\cdot)]^T, \quad C = \text{diag}(c_1, c_2, \dots, c_n), \quad c_i > 0$$

其中 $f(y(\cdot)) = [f_1(y_1(\cdot)), f_2(y_2(\cdot)), \dots, f_n(y_n(\cdot))]^T$ 为输出向量； $A = \{a_{ij}\}$ 为反馈矩阵； $B = \{b_{ij}\}$ 为时滞矩阵； $S = [s_1, s_2, \dots, s_n]^T$ 为阈值； $f_i(\cdot)$ 可以考虑一个特殊的函数

$$f_i(y_i) = 0.5(|y_i + 1| - |y_i - 1|), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

τ 为时滞，当 $\tau(t)$ 随着时间变化时，时变时滞细胞神经网络可以描述为

$$\dot{y}(t) = -Cy(t) + Af(y(t)) + Bf(y(t-\tau(t))) + S \quad (2-3)$$

定义 2.1 没有输入作用的系统，通常被称为自治系统。当自治系统为非线性和时变的最一般情况时，自治系统可用如下的非线性向量状态方程来描述：

$$\dot{x} = f(x, t), \quad x(t_0) = x_0, \quad t \geq t_0$$