

非线性多变量多模型 神经网络自适应解耦控制

富月/著

Nonlinear Multivariable Adaptive Decoupling
Control Based on Multiple Models and Neural Networks



科学出版社

非线性多变量多模型神经网络 自适应解耦控制

富月 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统介绍具有不确定性的非线性单变量系统、非线性多变量系统、非线性多变量强耦合系统的自适应控制以及自适应解耦控制理论和方法。本书大部分内容取材于作者多年来在控制领域取得的研究成果。本书主要内容包括非线性单变量多模型神经网络自适应控制、非线性多变量多模型神经网络自适应控制、非线性多变量多模型神经网络自适应闭环解耦控制、非线性多变量多模型神经网络自适应开环解耦控制、非线性多变量自适应智能解耦控制,以及上述算法的仿真实验和稳定性、收敛性分析。

本书既可作为工业过程控制领域的科技工作者的参考用书,也可作为高等院校控制理论与控制工程专业以及其他相关专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

非线性多变量多模型神经网络自适应解耦控制/富月著. —北京: 科学出版社, 2018.11
ISBN 978-7-03-059129-6

I. ①非… II. ①富… III. ①非线性-多变量-人工神经网络-自适应控制系统 IV. ①TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 238853 号

责任编辑: 姜 红 常友丽 / 责任校对: 蒋 萍
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 11 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2018 年 11 月第一次印刷 印张: 10 1/4

字数: 207 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

20 世纪 80 年代以来, 非线性系统的自适应控制一直都是控制领域富有挑战性的前沿课题之一。在非线性自适应控制所针对的两类非线性系统中, 研究由非线性自回归滑动平均 (nonlinear auto regressive moving average, NARMA) 模型描述的非线性系统的控制问题具有重要意义和广阔的应用前景。但是由于这类系统的当前控制输入的非线性依赖性, 其研究难度很大。此外由于复杂系统同时具有非线性、多变量、强耦合、非最小相位、参数跳变等特点, 给自动控制系统的设计带来更大的困难。因此, 由 NARMA 模型描述的非线性系统的自适应控制和自适应解耦问题一直是控制界的热点研究领域之一。

本书力图在有限的篇幅内对非线性自适应控制和非线性自适应解耦控制的研究成果进行尽可能详细、全面的介绍。书中首先介绍非线性自适应控制、多模型自适应控制以及多变量自适应解耦控制的研究现状, 随后分别针对非线性单变量系统和非线性多变量系统介绍基于多模型和神经网络的直接自适应控制方法和间接自适应控制方法, 接着针对非线性多变量强耦合系统介绍基于多模型和神经网络的直接自适应闭环解耦控制方法、间接自适应闭环解耦控制方法、直接自适应开环解耦控制方法、间接自适应开环解耦控制方法, 最后针对非线性多变量强耦合参数跳变系统介绍自适应智能解耦控制方法。本书中针对上述所有算法都给出了仿真实验结果和稳定性、收敛性分析方法。

本书介绍的研究内容得到东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室支持, 并且得到了国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目“复杂工业生产过程实时智能控制理论与算法研究”(项目编号: 2002CB312201) 和国家自然科学基金项目“非线性多变量自适应最优解耦控制及在钢球磨煤机制粉系统中的应用”(项目编号: 61573090) 的支持, 还得到了作者的博士研究生导师柴天佑院士的支持, 在此一并表示感谢。

限于作者水平, 书中不足之处在所难免, 殷切希望广大读者批评指正。

作 者

2018 年 5 月

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 自适应控制系统的产生	1
1.2 自适应控制方法	1
1.2.1 模型参考自适应控制	1
1.2.2 自校正控制	2
1.3 非线性自适应控制方法	3
1.3.1 非线性系统的类型	3
1.3.2 非线性自适应控制	5
1.4 多模型自适应控制方法	11
1.4.1 间接多模型自适应控制	12
1.4.2 直接多模型自适应控制	13
1.4.3 加权多模型自适应控制	14
1.5 多变量自适应解耦控制方法	15
1.5.1 线性自适应解耦控制	15
1.5.2 非线性自适应解耦控制	17
1.5.3 多模型自适应解耦控制	18
2 非线性单变量多模型神经网络自适应控制	19
2.1 引言	19
2.2 问题描述	19
2.3 一步超前最优加权控制律	23
2.4 多模型神经网络直接自适应控制	25
2.4.1 线性鲁棒直接自适应控制	26
2.4.2 多模型直接自适应控制	28
2.4.3 稳定性和性能分析	31
2.4.4 仿真实验	33

2.5	多模型神经网络间接自适应控制	35
2.5.1	线性鲁棒间接自适应控制	36
2.5.2	多模型间接自适应控制	39
2.5.3	稳定性和性能分析	42
2.5.4	仿真实验	44
2.6	小结	45
3	非线性多变量多模型神经网络自适应控制	46
3.1	引言	46
3.2	问题描述	46
3.3	一步超前最优控制律	50
3.4	多变量系统多模型神经网络直接自适应控制	51
3.4.1	线性鲁棒直接自适应控制	51
3.4.2	多模型直接自适应控制	54
3.4.3	稳定性和性能分析	56
3.4.4	仿真实验	57
3.5	多变量系统多模型神经网络间接自适应控制	61
3.5.1	线性鲁棒间接自适应控制	61
3.5.2	多模型间接自适应控制	65
3.5.3	稳定性和性能分析	67
3.5.4	仿真实验	69
3.6	小结	70
4	非线性多变量多模型神经网络自适应闭环解耦控制	72
4.1	引言	72
4.2	问题描述	72
4.3	一步超前最优加权闭环解耦控制律	73
4.4	多模型神经网络直接自适应闭环解耦控制	76
4.4.1	线性鲁棒直接自适应闭环解耦控制	77
4.4.2	多模型直接自适应闭环解耦控制	79
4.4.3	稳定性和性能分析	81
4.4.4	仿真实验	83
4.5	多模型神经网络间接自适应闭环解耦控制	86
4.5.1	线性鲁棒间接自适应闭环解耦控制	87

4.5.2	多模型间接自适应闭环解耦控制	90
4.5.3	稳定性和性能分析	92
4.5.4	仿真实验	94
4.6	小结	95
5	非线性多变量多模型神经网络自适应开环解耦控制	97
5.1	引言	97
5.2	问题描述	97
5.3	一步超前最优加权开环解耦控制律	98
5.4	多模型神经网络直接自适应开环解耦控制	100
5.4.1	线性鲁棒直接自适应开环解耦控制	101
5.4.2	多模型直接自适应开环解耦控制	104
5.4.3	稳定性和性能分析	107
5.4.4	仿真实验	109
5.5	多模型神经网络间接自适应开环解耦控制	112
5.5.1	线性鲁棒间接自适应开环解耦控制	113
5.5.2	多模型间接自适应开环解耦控制	116
5.5.3	稳定性和性能分析	119
5.5.4	仿真实验	120
5.6	小结	122
6	非线性多变量自适应智能解耦控制	123
6.1	引言	123
6.2	问题描述	124
6.3	智能解耦控制策略	124
6.3.1	神经网络近似	126
6.3.2	估计模型及相应的控制器	126
6.3.3	切换机制	128
6.3.4	算法总结	128
6.4	稳定性和性能分析	129
6.5	风洞系统中的应用	131
6.5.1	风洞系统描述	131
6.5.2	风洞系统控制的主要难点	132
6.5.3	风洞系统数值模拟器	133

6.5.4 仿真实验	135
6.5.5 试验	137
6.6 小结	138
参考文献	140
附录	152

1.1 自适应控制系统的产生

控制的基本概念是反馈，反馈控制是一个将测量得到的输出量送回输入端，并与期望值相比较产生偏差信号，通过调整使偏差越来越小的过程。1932~1960年，针对参数已知的线性系统，出现了很多基于反馈的行之有效的控制方法。很多情况下，在实际过程的控制中，设计者事先并不完全知道系统的特性，而技术的不断发展需要更快和更精确的控制器，如果应用传统的反馈控制器就不会得到良好的控制效果。为解决这一问题，1957年 Drenick 等^[1]提出了自适应系统，并定义为具有监视自己的性能和调整自己的参数使其达到更好性能的控制系统。但是，不久之后这种从生物学中引入的定义被普遍认为缺乏准确性，因为很多这样的系统与传统的反馈控制系统并没有本质的区别。在接下来的几年时间里，关于自适应系统的定义还有很多争论，并且出现了很多其他的定义方式^[2,3]。本书为了数学上的可处理性，考虑一类特殊的非线性系统并且定义为自适应系统。当人们试图控制具有未知参数的线性/非线性系统时，这样的系统就出现了，整个系统是非线性的，同时，它的行为渐近收敛于时不变的线性/非线性系统。这种关于自适应系统的定义在关于自适应控制的标准教科书^[4,5]中被广泛采用，并且在最近的出版物中也被使用。

1.2 自适应控制方法

在过去的几十年中，自适应控制得到了广泛的发展，先后出现过许多形式完全不同的自适应控制方法。但是无论从理论研究还是实际应用的角度来看，目前比较成熟的自适应控制方法主要有两大类：模型参考自适应控制和自校正控制。

1.2.1 模型参考自适应控制

模型参考自适应控制用来解决性能规范由给定的参考模型规定的控制问题，

这个参考模型指明了过程输出应怎样理想地响应指令信号。在模型参考自适应控制中,指令信号在输入到控制器的同时也加到参考模型的输入端,因此参考模型相当于输出响应的一个样板,即参考模型的输出或状态规定了系统的期望性能指标。为了比较给定的性能和实测性能,将参考模型和可调系统的过程输出或状态相减,得到广义误差信号。自适应机构根据这个信号和一定的自适应规律产生反馈作用,以修改控制器参数或产生一个辅助信号,促使可调系统与参考模型相一致,使广义误差趋于极小或渐近收敛为零^[6]。

模型参考自适应控制最初由 Whitaker 等^[7]于 1958 年提出,他们基于局部参数最优化理论导出了自适应规律的算法(MIT 算法),并在飞行控制器中得到应用。但是,这一方法的最大缺点是不能确保所设计的自适应系统是全局渐近稳定的。因此,20 世纪 60 年代中期, Parks^[8]提出了用李雅普诺夫函数法设计模型参考自适应系统,此后,许多学者^[9-12]又在这方面做了许多工作,对控制方案进行了改进。在 Popov 提出超稳定性理论后, Landau^[13]于 1974 年把这一稳定理论用于模型参考自适应系统的设计中,引起了各国学者的重视。多年来许多学者^[14-18]在模型参考自适应系统的稳定性、收敛性和设计方法等方面都做出了许多贡献。

1.2.2 自校正控制

自校正控制是应用系统的输入、输出数据在线辨识被控系统或控制器参数,应用参数估计值去调整控制器参数,从而适应被控系统的不确定性,使该系统处于良好运行状态的一种自适应控制方法。自校正控制技术特别适用于结构已知和参数未知而恒定或缓慢时变的系统。由于大多数工业对象都具有这些特征,再加上自校正控制技术理解直观,实现简单经济,所以它在工业过程控制中已得到广泛应用,现已成为十分重要的一类自适应控制方法^[6]。

自校正控制思想可追溯到 1958 年 Kalman^[19]发表的一篇文章,文章介绍了在参数估计的基础上计算最优控制器的所谓自最优控制系统。但是直到 1973 年 Aström 等^[20]证明了自校正最小方差控制对于由自回归滑动平均(autoregressive moving-average,ARMA)模型描述的系统的收敛性和最优性之后,自校正的思想才得到了关键性的、实质性的进展。随后人们致力于提高自校正的性能和扩大它的应用范围。1975 年 Clarke 等^[21]针对随机系统,提出了广义最小方差自校正控制器,它克服了最小方差自校正控制器只可应用于最小相位系统的缺点,因此受到普遍的重视。Aström 等^[22]在 1980 年解决了零极点配置自校正调节问题并将自校正控制推广到多变量系统中。此外,广义预测和比例-积分-微分(proportional-integral-derivative,PID)等自校正控制方案也纷纷出现并得到迅速发展^[23,24]。

自校正控制根据算法的实现方式可分为直接(隐式)自校正控制和间接(显

式)自校正控制两类。直接算法是直接辨识控制器参数,间接算法则首先辨识被控系统的参数,然后将其估计值当成真参数去计算控制器参数。

本书研究的是自校正控制,如不做特殊说明将统称为自适应控制。

1.3 非线性自适应控制方法

20世纪80年代以来,非线性系统的自适应控制一直都是控制领域富有挑战性的前沿课题之一。在连续几年的美国控制会议(American Control Conference, ACC)、控制与决策会议(Control and Decision Conference, CDC)以及国际自动化联合控制(International Federation of Automatic Control, IFAC)等国际大会上,非线性系统的自适应控制都作为专题被列出,学者发表了大量的学术论文。在1993年IFAC世界大会上, D. J. Hill 等还专门作了非线性系统自适应控制的综述报告,介绍了当时非线性系统自适应控制研究中所取得的成果。在1994年和1995年的ACC上,除了会中的专题报告外,会前还举行了由 P. V. Kokotovic 主持的为期一天的非线性系统自适应控制的专题讨论会^[25]。在有影响的国际学术刊物上也经常有非线性系统自适应控制的论文发表。国外自适应控制和非线性控制领域的许多著名学者最近十几年都在进行非线性系统自适应控制方面的研究工作。由于实际的控制系统基本上是非线性的,且都存在不确定性,因此研究非线性系统的自适应控制无论在理论上还是在实际应用中都具有重要的意义。

1.3.1 非线性系统的类型

非线性自适应控制的发展是一个由简单到复杂、由浅入深、由理论研究到应用研究的过程。非线性自适应控制所研究的主要是两类非线性系统:一类是状态空间模型描述的非线性系统;一类是输入、输出模型描述的非线性系统。对于用状态空间描述的非线性系统,当系统的状态不可测,只有输入、输出数据可测时, Cabrera 等^[26]以及 Leontaritis 等^[27]给出了由状态空间模型转化为输入、输出模型的方法,并指出当系统满足一定的假设条件时,两者在平衡点的某一邻域内是等价的。基于这一原因,很多学者都致力于研究由输入、输出模型描述的非线性系统。这类系统主要分为三类,第一类是具有简单结构的非线性系统,如具有输入(或输出)非线性的系统、双线性系统或者未知参数呈线性的非线性系统;第二类是仿射非线性系统;第三类是可由非线性自回归滑动平均(nonlinear auto regressive moving average, NARMA)模型描述的非线性系统。

1. 具有简单结构的非线性系统

在这类非线性系统中, 研究比较多的是具有输入(或输出)非线性的系统, 即在线性控制对象的输入(或输出)端具有非线性环节, 这些非线性环节包括饱和、多项式、预负载、死区、间隙、滞环、继电器等。因为此类模型相对简单, 对象参数是线性的, 便于应用现已成熟的递推辨识算法, 而且这些模型可描述一大类工业、生物等实际过程的非线性对象, 有很好的应用前景。另外, 由于非线性环节的存在, 这类系统的自适应控制有它的特殊性, 并不是线性系统自适应控制的简单平移。事实上, 从理论分析、计算机仿真或物理实验都可明显看出, 对这类系统应用线性系统的自适应控制方法不能达到满意的控制效果, 甚至会使系统失稳。因此, 研究具有输入(或输出)非线性系统的自适应控制具有重要的理论和应用价值, 相关研究也取得了可喜的研究成果, 几十年来在有影响的国际学术刊物上有上百篇相关学术论文发表^[25]。

2. 仿射非线性系统

仿射是一个几何概念, 仿射系统是一个系统经仿射坐标变换后的对应系统。一般而言, 仿射非线性系统是一类只有当前控制量 $u(t)$ 是非线性的非线性系统, 以离散时间单输入、单输出系统为例, 具体表示如下:

$$y(t+d) = f[y(t+d-1), \dots, y(t+d-n), u(t-1), \dots, u(t-m)] \\ + g[y(t+d-1), \dots, y(t+d-n), u(t-1), \dots, u(t-m)]u(t) \quad (1.3.1)$$

式中, $y(t), u(t) \in \mathcal{R}$ 分别为系统输出和控制输入; m, n 为系统阶次; $d \geq 1$, 为系统的时滞。

一直以来, 上述仿射非线性系统都是人们研究的热点和焦点。这是因为控制量可以显式的表示出来, 并且通过适当的变量代换, 它可转化成仿射状态空间系统, 这样, 采用传统的状态反馈或输出反馈就可以实现良好的控制^[28-31]。

3. 由 NARMA 模型描述的非线性系统

比以上两类更一般的非线性系统是 Billings 等^[32]于 1981 年提出的一类由 NARMA 模型描述的一类系统。它是一种用差分方程来描述输入、输出关系的非线性系统, 具有如下形式:

$$y(t+d) = f[y(t+d-1), \dots, y(t+d-n), u(t), \dots, u(t-m)] \quad (1.3.2)$$

式中, $y(t), u(t), m, n, d$ 的意义同上。

Leontaritis 等^[33]于 1985 年对 NARMA 模型进行了详细的描述, 并阐明了用 NARMA 模型来描述非线性系统具有的优点: ①NARMA 模型比上两类模型能更真实地描述非线性系统; ②NARMA 模型便于将已有的线性递推辨识算法和线性

自适应控制方法加以推广和应用；③NARMA 模型可以包含一大类非线性系统，如 Hammerstein 系统和双线性系统等。在之后的几十年中，很多学者都对 NARMA 模型的辨识和自适应控制进行了深入的研究，提出了一系列行之有效的方法，并用理论证明和仿真实验对所提方法进行了充分的论证^[34,35]。

对于许多实际的非线性系统，无论是仿射非线性系统还是由 NARMA 模型描述的非线性系统，要确定它们确切的非线性函数是非常困难的。为此，以由 NARMA 模型描述的系统为例，Leontariris 和 Billings 在大多数研究中，都将 NARMA 模型进行多项式展开，将未知参数转化为线性形式^[27,32,33]。但是，当系统阶次增加时，未知的线性参数的数量就会成指数增加，这势必会给系统的辨识和控制带来麻烦。

1.3.2 非线性自适应控制

非线性自适应控制方法主要分为以下几类：基于反馈线性化的非线性自适应控制方法、基于逐步反推（Backstepping）的非线性自适应控制方法和基于神经网络和模糊推理等的非线性自适应控制方法。本节简单介绍前两种方法，着重介绍基于神经网络的非线性自适应控制方法。

1. 基于反馈线性化的非线性自适应控制

反馈线性化方法作为非线性控制的一种有效方法，在非线形控制领域有举足轻重的地位。主要思想是通过选择适当的微分同胚或进行适当的状态或输出反馈变换，使非线性系统实现状态或输入、输出的精确线性化，从而将复杂的非线性系统综合问题转化为线性系统的综合问题。它与传统的利用泰勒展开进行局部线性化近似方法不同，在线性化过程中没有忽略任何高阶非线性项，因此这种线性化不仅是精确的，而且是整体的。然而，由于这一方法依赖系统非线性特性的精确信息，因此具有一定的局限性。

为了放松反馈线性化方法模型精确匹配的限制，1988 年，Nam 等^[36]提出了基于反馈线性化技术的非线性自适应控制方法，并于 1989 年由 Sastry 等^[37]以及 Taylor 等^[38]进行了进一步的阐述，之后，国内外许多学者致力于这方面的研究，并取得了令人瞩目的进展。

基于反馈线性化技术的非线性自适应控制方法主要有两种：一种是状态反馈控制，如文献[39]~文献[43]等；另一种是输出反馈控制，如文献[44]~文献[48]等。

2. 基于 Backstepping 的非线性自适应控制

反馈线性化方法除了要求系统具有精确的模型，还经常消除一些有用的非线

性特性。Backstepping 方法作为一种更灵活的方法，为解决不确定的非线性系统的控制问题提供了一种设计工具，并且避免了有用非线性特性的消除。Backstepping 方法是一种递推的方法，在每一步把状态坐标的变化、不确定参数的自适应调节函数和一个已知李雅普诺夫函数的虚拟控制系统的镇定函数等联系起来，通过逐步修正算法设计镇定控制器，实现系统的全局调节或跟踪。

基于 Backstepping 的非线性自适应控制方法是由 Kanellakopoulos 等^[49]于 1991 年首先提出的，之后引起了国内外众多学者的关注，相关的研究文献不断见诸各类期刊和论文集^[50-53]。该方法按照状态是否可测量分为两类：一类是状态反馈控制，如文献[49]、文献[54]~文献[57]等；另一类是输出反馈控制，如文献[45]、文献[58]~文献[60]等。

3. 基于神经网络的非线性自适应控制

1) 神经网络简介

神经网络是一个由大量的神经元相互连接组成的复杂网络。组成神经网络的神经元本身的结构和功能都是非常简单的，只是对输入的信号进行简单的变换再输出，而神经元之间的大量连接却导致神经网络成为一个复杂系统。神经网络的一个突出特点是具有学习功能，通过对样本的学习改变其内部的权值（输入、输出信号与神经元之间连接的强弱程度），进而改变存储在神经网络内的知识，或者说改变神经网络的功能，从而适应环境的变化。

从网络内部信息流动的方向上分类，神经网络分为动态网络和静态网络。动态网络由于其内部存在状态反馈，因而可以逼近动态的非线性系统。但是动态网络中的反馈形式极其繁多，故而至今没有得到完整统一的逼近理论。静态网络构成了从输入到输出的一个静态非线性映射，网络权值的不同就代表了不同的非线性映射。Funahashi^[61]、Cybenko 等^[62]、Hornik 等^[63]分别独立地证明了静态神经网络可以在指定的紧集上以任意精度逼近任意非线性解析函数，使得网络的逼近能力有了理论上的保证。本书只使用静态网络，下面介绍几种经典的静态网络。

(1) BP 神经网络。20 世纪 80 年代中期，以 Rumelhart 等为首的学者提出了多层前馈网络的反向传播（back propagation, BP）学习算法，简称 BP 算法^[64]。多层前馈网络的每个神经元用一个节点表示，网络由输入层、隐层和输出层节点组成。隐层可以是一层，也可以是多层，前层至后层节点通过权连接，即拓扑结构为有向无环图的前向网络。由于采用 BP 算法，所以常称之为 BP 神经网络。BP 神经网络中应用较多的是单隐层线性输出的静态 BP 神经网络，其结构如图 1.3.1 所示。

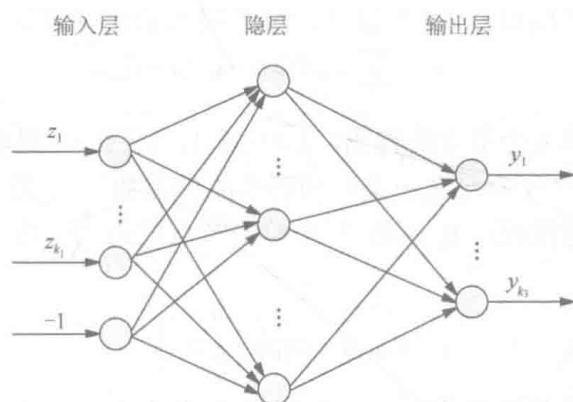


图 1.3.1 静态 BP 神经网络结构

设上述 BP 神经网络有 k_1 个输入、 k_2 个隐元和 k_3 个输出，输入向量为

$$u = [u_1, \dots, u_{k_1}]^T \in \mathcal{R}^{k_1} \quad (1.3.3)$$

将阈值 -1 归入输入向量中，得到增广输入向量：

$$u' = [u_1, \dots, u_{k_1}, -1]^T \in \mathcal{R}^{k_1+1} \quad (1.3.4)$$

则可形成 $k_2 \times (k_1 + 1)$ 维输入权矩阵 W_1 和 $k_3 \times k_2$ 维输出权矩阵 W_2 。隐层神经元为 Sigmoid 函数，输出层为线性输出。神经网络的解析结构用矩阵可以表示为

$$y = W_2 \cdot \text{Sigm}[W_1 \cdot u'] := \text{NN}[W, u] \quad (1.3.5)$$

式中， $\text{NN}[\cdot]$ 表示神经网络结构； W 表示由 W_1 和 W_2 组成的网络的权； u 为网络的输入向量； y 为网络输出； $\text{Sigm}[\cdot]$ 为 Sigmoid 算子，表示对其输入向量的每一个分量进行 Sigmoid 变换。对于标量 u_j ，Sigmoid 函数一般可以取为

$$s(u_j) = \frac{1 - e^{-\beta u_j}}{1 + e^{-\beta u_j}}, \quad \beta > 0 \quad (1.3.6)$$

BP 算法是误差信号（样本输出和网络输出之差）按原连接通道反向计算，由梯度下降法调整各层神经元的权值和阈值，使误差减小。标准的 BP 算法采用优化算法中的梯度下降法，从数学角度看，它把一组样本的输入、输出问题变为非线性优化问题，经迭代运算求解权值，使误差信号达到要求的程度。隐层的作用是使优化问题的可调参数增加，使解更精确。由于 BP 神经网络的隐层激励函数是 Sigmoid 函数，因此它是全局逼近网络，但是由于采用梯度下降算法，网络的收敛速度较慢。为克服这一缺点，可以使用一些改进的 BP 算法，如具有阻尼项的权值调整算法和变步长算法等。BP 神经网络由于其算法简单，在很多领域得到应用，在自动控制中是被应用较多的网络之一，但是它还存在很多缺点，如存在局部极小、收敛速度与初始权的选择有关、网络结构设计无理论指导等。

(2) 径向基函数神经网络。径向基函数 (radial basis function, RBF) 神经网络是由 Moody 等^[65]于 20 世纪 80 年代末期提出的一种神经网络，它是具有单隐层的

三层前馈网络，其结构与图 1.3.1 相似。RBF 网络通常具有如下形式：

$$y_k = \sum_i w_{ki} R(\|u - c_i\|) - \theta_k \quad (1.3.7)$$

式中， y_k 为输出层第 k 个节点的输出， $k \in [1, k_3]$ ； $u \in \mathcal{R}^{k_1}$ ，是输入向量； $c_i \in \mathcal{R}^{k_1}$ ，是第 i 个隐节点的中心， $i=1, 2, \dots, k_2$ ； $\|\cdot\|$ 表示欧氏范数； w_{ki} 是第 i 个隐节点和第 k 个输出节点之间的连接权； θ_k 为第 k 个输出节点的阈值； $R(\cdot)$ 为高斯函数，对于标量 u_j ，一般取为

$$R(u_j) = \exp\left(-\frac{1}{2}u_j\right) \quad (1.3.8)$$

RBF 神经网络的基本思想是，用 RBF 作为隐单元的“基”构成隐层空间，这样就可以将输入矢量不通过权连接而直接映射到隐空间。当 RBF 的中心点确定以后，这种映射关系也就确定了。而隐层空间到输出空间的映射是线性的，即网络的输出是隐元输出的线性加权和。这样 RBF 神经网络从输入到输出的映射是非线性的，但输出对于可调参数而言又是线性的。因此就可以采用简单的调权律，使得网络的学习速度大大加快，并且避免局部极小问题。与 BP 网络一样，RBF 网络也有其自身的局限性，如如何确定隐节点中心 c_i 、如何确定隐节点数以使网络学习达到要求的精度等问题还没有得到解决。当前，采用计算机选择、设计，再检验是一种通用的手段。

(3) 高阶神经网络。高阶 (high-order, HO) 神经网络是由 Dembo 等^[66]于 20 世纪 90 年代初提出的一种神经元之间通过 Sigmoid 算子高阶连接的网络。通常具有如下形式：

$$y = W \cdot S(u) \quad (1.3.9)$$

式中， $u \in \mathcal{R}^{k_1}$ ， $y \in \mathcal{R}^{k_3}$ ，分别为网络的输入和输出向量； $W \in \mathcal{R}^{k_3 \times k_2}$ ，为隐节点和输出节点之间的连接权矩阵； k_2 为隐节点数； $S(u)$ 为 k_2 维向量，其第 i 个元素， $i=1, 2, \dots, k_2$ ，可表示为

$$s_i(u) = \prod_{j \in I_{k_2}} s(u_j)^{d_j(i)} \quad (1.3.10)$$

其中， $\{I_1, I_2, \dots, I_{k_2}\}$ 为 $\{1, \dots, k_1\}$ 的 k_2 个子集的集合； $d_j(i)$ 为非负整数。上式中 $s(u_j)$ 是一个单调递增的光滑函数，通常采用如下的 Sigmoid 形式：

$$s(u_j) = \frac{1 - e^{-u_j}}{1 + e^{-u_j}} \quad (1.3.11)$$

HO 神经网络具有良好的存储能力^[67,68]，当权值固定时具有良好的稳定性^[69,70]。此外由于 HO 神经网络还具有对学习律、Sigmoid 算子的坡度、初始权的选择不敏感等优点^[71]，因此能够更准确有效的辨识非线性动态。目前 HO 神经网络已被很多学者应用于各种领域，并且提出了各种不同的学习算法，保证网络权值有界^[72]。

2) 神经网络自适应控制

基于反馈线性化和 Backstepping 的非线性自适应控制方法主要是针对未知的不确定参数呈线性, 并且系统的非线性项精确已知的非线性系统。近年来, 随着神经网络等智能方法的引入和 BP 算法^[73]的普及与发展, 出现了针对非线性项未知的基于神经网络的自适应控制方法^[74-77]。然而, 这些神经网络控制方法缺乏稳定性、鲁棒性和收敛性分析。Chen 等^[31,78]提出的具有稳定性分析的神经网络控制器, 只有当神经网络的初始权值非常接近理想权值时, 才能保证系统的收敛性, 因此需要对神经网络进行充分的离线训练。为解决上述问题, 有学者等在文献 [79]~文献[83]中提出了基于李雅普诺夫稳定性的神经网络控制方法。

上述基于神经网络的自适应控制方法都是针对仿射非线性系统的。由于缺乏有力的分析工具和控制方法, 非仿射非线性系统的自适应控制问题一直未能得到很好地解决。一些学者研究采用神经网络估计被控系统的逆动态或逆系统模型, 实现神经网络“逆控制”, 以解决非仿射非线性系统的自适应控制问题。如图 1.3.2 所示, 在基于逆动态的直接自适应控制方法中, 神经网络控制器 NNC 的权值是通过控制输入和神经逆模型 NNI 输出之间的误差来调整的^[84,85]。另外一种直接自适应控制方法如图 1.3.3 所示, 它是通过系统输出和参考输入之间的误差调整权值实现的^[86,87]。间接自适应控制方法如图 1.3.4 所示, 神经网络控制器 NNC 的权值是通过神经辨识器 NNI 的输出和参考输入之间的误差来调整的^[26,88]。

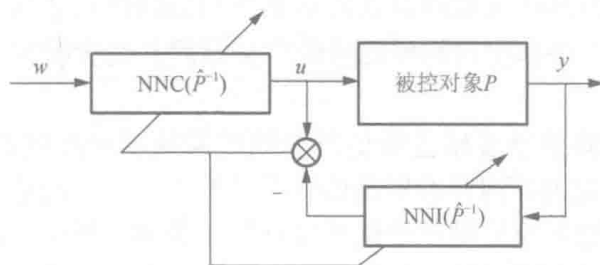


图 1.3.2 基于逆动态的神经网络直接自适应控制系统框图 I

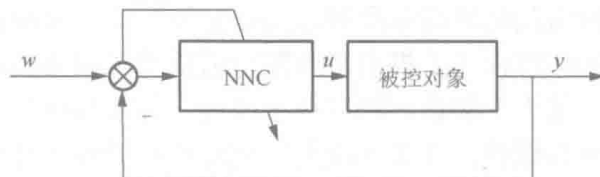


图 1.3.3 基于逆动态的神经网络直接自适应控制系统框图 II