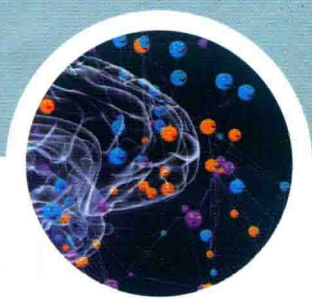


电子信息与电气工程技术丛书

E&E

本书英文版由Springer出版发行

RBF NEURAL NETWORK  
CONTROL FOR MECHANICAL  
SYSTEMS: DESIGN, ANALYSIS  
AND MATLAB SIMULATION,  
SECOND EDITION



# RBF神经网络 自适应控制及MATLAB仿真 (第2版)

刘金琨 著

Liu Jinkun



清华大学出版社

电子信息与电气工程技术丛书 (E&E)

RBF NEURAL NETWORK CONTROL FOR  
MECHANICAL SYSTEMS: DESIGN, ANALYSIS AND  
MATLAB SIMULATION, SECOND EDITION

RBF神经网络  
自适应控制及MATLAB仿真  
(第2版)

刘金琨 著

Liu Jinkun



清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书结合典型机械系统控制的实例,系统地介绍了神经网络控制的基本理论、基本方法和应用技术。本书是作者多年来从事控制系统教学和科研工作的结晶,同时融入了国内外同行近年来所取得的新成果。

全书共分16章,包括绪论、RBF神经网络的设计与仿真、基于梯度下降法的RBF神经网络控制、自适应RBF神经网络控制、RBF神经网络滑模控制、基于模型整体逼近的自适应RBF控制、基于局部逼近的自适应RBF控制、基于RBF神经网络的动态面自适应控制、数字RBF神经网络控制、离散神经网络控制、自适应RBF观测器设计及滑模控制、基于RBF神经网络的反演自适应控制、基于RBF神经网络的自适应容错控制、基于RBF神经网络的自适应量化控制、基于RBF神经网络的控制输出受限控制和基于RBF神经网络的控制方向未知的状态跟踪。每种控制方法都通过MATLAB进行了仿真分析。

本书各部分内容既相互联系又相对独立,读者可根据需要选择学习。本书适用于从事生产过程自动化、计算机应用、机械电子和电气自动化领域的工程技术人员阅读,也可作为大专院校工业自动化、自动控制、机械电子、自动化仪表、计算机应用等专业的教学参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

RBF神经网络自适应控制及MATLAB仿真/刘金琨著.—2版.—北京:清华大学出版社,2018

(电子信息与电气工程技术丛书)

ISBN 978-7-302-51732-0

I. ①R… II. ①刘… III. ①神经网络—自适应控制—研究 ②神经网络—计算机仿真 ③Matlab软件 IV. ①TP183 ②TP391.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第267511号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:白蕾

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载:<http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:27

版 次:2014年1月第1版 2018年12月第2版

定 价:99.00元



字 次:2018年12月第1次印刷

产品编号:080457-01

神经网络控制出现于 20 世纪 80 年代,经历了 30 余年的发展,已形成了一个相对独立的研究分支,成为智能控制系统的一种设计方法,适用于线性与非线性系统、连续与离散系统、确定性与不确定性系统、集中参数与分布参数系统、集中控制与分散控制系统等。

神经网络具有高度并行的结构、强大的学习能力、连续非线性函数逼近能力、容错能力等优点,极大地促进与拓展了神经网络技术在非线性系统辨识与控制中的应用。在实际工业过程中,存在着非线性、未建模动态、不可测噪声以及多环路等问题,这些问题对控制系统设计提出了很大的挑战。

与传统的控制策略相比,神经网络在如下几个方面具有优势。

(1) 神经网络对任意函数都具有学习能力,神经网络的自学习能力可避免在传统自适应控制理论中占有重要地位的复杂数学分析。

(2) 针对传统控制方法不能解决的高度非线性控制问题,多层神经网络的隐含层神经元采用了激活函数,具有非线性映射功能,这种映射可以逼近任意非线性函数,为解决非线性控制问题提供了有效的解决途径。

(3) 传统自适应控制方法需要模型先验信息来设计控制方案,由于神经网络的逼近能力,控制器不需要具体的模型信息。因此,神经网络控制可以被广泛用于解决具有不确定模型的控制问题。

(4) 在神经网络大规模并行处理架构下,网络的某些节点损坏并不影响整个神经网络的整体性能,有效地提高了控制系统的容错性。

有关神经网络控制理论及其工程应用,近年来已有大量的论文发表。作者多年来一直从事智能控制及应用方面的研究和教学工作,为了促进神经网络控制和自动化技术的进步,反映神经网络控制设计与应用中的最新研究成果,并使广大工程技术人员能了解、掌握和应用这一领域的最新技术,学会用 MATLAB 语言进行 RBF(Radial Basis Function, 径向基函数)网络控制器的设计,作者编写了这本书,以期抛砖引玉,供广大读者学习参考。

本书是作者在总结多年研究成果的基础上,进一步使其理论化、系统化、规范化、实用化而成,其特点是:

(1) 书中给出的 RBF 神经网络控制算法简单,内容先进,取材着重于基本概念、基本理论和基本方法;

(2) 本书针对每种 RBF 神经网络控制算法给出了完整的 MATLAB 仿真程序,并给出了程序的说明和仿真结果,具有很强的可读性;

(3) 着重从应用角度出发,突出理论联系实际的功能,面向广大工程技术人员,具有很强的工程性和实用性,书中有大量应用实例及其结果分析,为读者提供了有益的借鉴;

(4) 所给出的各种 RBF 神经网络控制算法完整,程序设计结构力求简单明了,便于读者自学和进一步开发。

# 前言

全书共分 16 章。第 1 章为绪论,介绍神经网络控制的基本原理及其在理论和应用方面的发展状况,并介绍了一种简单的自适应控制设计方法;第 2 章介绍 RBF 神经网络的设计与仿真、影响 RBF 神经网络的参数及离线建模方法;第 3 章介绍基于梯度下降法的 RBF 神经网络控制方法,包括基于 RBF 神经网络的监督控制、基于 RBF 神经网络的模型参考自适应控制和 RBF 自校正控制三种方法;第 4 章介绍几种简单的 RBF 神经网络自适应控制的设计和分析方法;第 5 章介绍 RBF 神经网络滑模控制的设计及分析方法,并引入了一种基于神经网络最小参数学习法的自适应滑模控制方法;第 6 章和第 7 章分别介绍基于模型整体逼近的自适应 RBF 控制和基于局部逼近的自适应 RBF 控制,并以机械手控制为例给出了控制器的设计和分析实例;第 8 章以柔性机械臂的控制为例,介绍基于 RBF 神经网络的自适应动态面控制的设计和分析方法;第 9 章介绍 RBF 神经网络自适应控制的离散化方法;第 10 章介绍离散系统的 RBF 神经网络控制器设计及离散控制系统的稳定性分析方法;第 11 章介绍自适应 RBF 神经网络观测器的设计和分析方法;第 12 章介绍基于 RBF 神经网络的反演自适应控制方法;第 13 章介绍基于 RBF 神经网络的自适应容错控制方法;第 14 章介绍基于 RBF 神经网络的自适应量化控制方法;第 15 章介绍基于 RBF 神经网络的控制输出受限控制;第 16 章介绍基于 RBF 神经网络的控制方向未知的状态跟踪。

本书是作者在原有的英文版著作 *RBF Neural Network Control for Mechanical Systems—Design, Analysis and Matlab Simulation* (Jinkun LIU, Tsinghua & Springer Press, 2013) 和原有的中文版著作《RBF 神经网络自适应控制 MATLAB 仿真》(北京:清华大学出版社,2014) 基础上撰写的,并做了适当的增减。

本书是在 MATLAB 的 R2011a 环境下开发的,各章节具有很强的独立性,读者可以结合自己的方向深入地进行研究。

作者在本书编写过程中得到新加坡国立大学葛树志教授的热情支持和宝贵建议,在此表示感谢。

假如读者对算法和仿真程序有疑问,可通过 E-mail 与作者联系(邮箱:ljik@buaa.edu.cn)。程序下载网址为 <http://shi.buaa.edu.cn/liujinkun>。由于作者水平有限,书中难免存在一些不足和疏漏之处,欢迎广大读者批评指正。

作者

于北京航空航天大学

## 符号说明

$\mathbf{R} \triangleq$  实数集合

$\mathbf{R}^n \triangleq n$  维向量实数集合

$\mathbf{R}^{n \times m} \triangleq n \times m$  维矩阵向量实数集合

$|a| \triangleq$  标量  $a$  的绝对值

$\det(\mathbf{A}) \triangleq$  矩阵  $\mathbf{A}$  的行列式

$\|\mathbf{x}\| \triangleq$  矢量  $\mathbf{x}$  的范数

$\mathbf{A}^T \triangleq$  矩阵  $\mathbf{A}$  的转置

$\mathbf{A}^{-1} \triangleq$  矩阵  $\mathbf{A}$  的逆

$\mathbf{I} \triangleq$  单位矩阵

$\mathbf{I}_n \triangleq n \times n$  维单位矩阵

$\lambda_i(\mathbf{A}) \triangleq \mathbf{A}$  的第  $i$  个特征值

$\lambda(\mathbf{A}) \triangleq \mathbf{A}$  的特征值集合

$\lambda_{\min}(\mathbf{A}) \triangleq$  矩阵  $\mathbf{A}$  的最小特征值

$\lambda_{\max}(\mathbf{A}) \triangleq$  矩阵  $\mathbf{A}$  的最大特征值

$x_i \triangleq$  向量  $\mathbf{x}$  的第  $i$  个元素

$a_{ij} \triangleq$  矩阵  $\mathbf{A}$  的第  $ij$  元素

$(\hat{\cdot}) \triangleq (\cdot)$  的估计值

$(\bar{\cdot}) \triangleq (\cdot) - (\hat{\cdot})$

$\sup \alpha(t) \triangleq \alpha(t)$  的上界

$\text{diag}[\dots] \triangleq$  给定元素构成的对角阵

$\mathbf{h} \triangleq$  RBF 网络高斯基函数的输出向量

$\mathbf{c}_j \triangleq$  RBF 网络高斯基函数第  $j$  个神经元的中心点向量

$b_j \triangleq$  RBF 网络高斯基函数第  $j$  个神经元的基宽

$\mathbf{W} \triangleq$  RBF 网络的权值矩阵

$\log x$  表示自然对数

注：本书的示例采用英文版 MATLAB 软件仿真，所以书中仿真图形中的图字为英文，不区分物理量正体与斜体，与代码中的物理量一致。

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 神经网络控制 .....	1
1.1.1 神经网络控制的提出 .....	1
1.1.2 神经网络控制概述 .....	2
1.1.3 自适应 RBF 神经网络概述 .....	2
1.2 RBF 神经网络 .....	2
1.3 机器人 RBF 神经网络控制 .....	3
1.4 控制系统 S 函数设计 .....	3
1.4.1 S 函数介绍 .....	3
1.4.2 S 函数基本参数 .....	4
1.4.3 实例 .....	4
1.5 简单自适应控制系统设计实例 .....	5
1.5.1 系统描述 .....	5
1.5.2 自适应控制律设计 .....	6
1.5.3 仿真实例 .....	6
附录 仿真程序 .....	8
参考文献 .....	12
第 2 章 RBF 神经网络设计与仿真 .....	15
2.1 RBF 神经网络算法及仿真 .....	15
2.1.1 RBF 神经网络算法设计 .....	15
2.1.2 RBF 神经网络设计实例及 MATLAB 仿真 .....	15
2.2 基于梯度下降法的 RBF 神经网络逼近 .....	18
2.2.1 RBF 神经网络逼近 .....	18
2.2.2 仿真实例 .....	19
2.3 高斯基函数的参数对 RBF 网络逼近的影响 .....	20
2.4 隐含层节点数对 RBF 网络逼近的影响 .....	22
2.5 RBF 神经网络的建模训练 .....	25
2.5.1 RBF 神经网络训练 .....	25
2.5.2 仿真实例 .....	26
2.6 RBF 神经网络逼近 .....	27
附录 仿真程序 .....	28
参考文献 .....	44

# 目录

第 3 章 基于梯度下降法的 RBF 神经网络控制 .....	45
3.1 基于 RBF 神经网络的监督控制 .....	45
3.1.1 RBF 监督控制 .....	45
3.1.2 仿真实例 .....	46
3.2 基于 RBF 神经网络的模型参考自适应控制 .....	47
3.2.1 控制系统设计 .....	47
3.2.2 仿真实例 .....	48
3.3 RBF 自校正控制 .....	49
3.3.1 系统描述 .....	49
3.3.2 RBF 控制算法设计 .....	49
3.3.3 仿真实例 .....	50
附录 仿真程序 .....	51
参考文献 .....	56
第 4 章 自适应 RBF 神经网络控制 .....	57
4.1 基于神经网络逼近的自适应控制 .....	57
4.1.1 系统描述 .....	57
4.1.2 自适应 RBF 控制器设计 .....	57
4.1.3 仿真实例 .....	60
4.2 基于神经网络逼近的未知参数自适应控制 .....	62
4.2.1 系统描述 .....	62
4.2.2 自适应控制设计 .....	63
4.2.3 仿真实例 .....	65
4.3 基于 RBF 神经网络的直接鲁棒自适应控制 .....	67
4.3.1 系统描述 .....	67
4.3.2 理想反馈控制和函数逼近 .....	67
4.3.3 控制器设计及分析 .....	68
4.3.4 仿真实例 .....	70
4.4 基于 RBF 神经网络的单参数直接鲁棒自适应控制 .....	73
4.4.1 系统描述 .....	73
4.4.2 仿真实例 .....	75
附录 仿真程序 .....	78
参考文献 .....	103
第 5 章 RBF 神经网络滑模控制 .....	104
5.1 经典滑模控制器设计 .....	104



5.2	基于 RBF 神经网络的二阶 SISO 系统的滑模控制 .....	106
5.2.1	系统描述 .....	106
5.2.2	基于 RBF 网络逼近 $f(\cdot)$ 的滑模控制 .....	106
5.2.3	仿真实例 .....	107
5.3	基于 RBF 逼近未知函数 $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 的滑模控制 .....	109
5.3.1	引言 .....	109
5.3.2	仿真实例 .....	110
5.4	基于神经网络最小参数学习法的自适应滑模控制 .....	112
5.4.1	问题描述 .....	112
5.4.2	基于 RBF 网络逼近的自适应控制 .....	112
5.4.3	仿真实例 .....	114
	附录 仿真程序 .....	115
	参考文献 .....	126
<b>第 6 章</b>	<b>基于模型整体逼近的自适应 RBF 控制 .....</b>	<b>127</b>
6.1	基于 RBF 神经网络补偿的机器人自适应控制 .....	127
6.1.1	系统描述 .....	127
6.1.2	RBF 网络逼近 .....	128
6.1.3	RBF 网络控制和自适应律设计及分析 .....	128
6.1.4	仿真实例 .....	131
6.2	基于滑模鲁棒项的 RBF 神经网络机器人控制 .....	135
6.2.1	系统描述 .....	135
6.2.2	RBF 逼近 .....	136
6.2.3	控制律设计及稳定性分析 .....	136
6.2.4	仿真实例 .....	137
6.3	基于 HJI 理论和 RBF 神经网络的鲁棒控制 .....	140
6.3.1	HJI 定理 .....	140
6.3.2	控制器设计及稳定性分析 .....	140
6.3.3	仿真实例 .....	142
	附录 仿真程序 .....	145
	参考文献 .....	174
<b>第 7 章</b>	<b>基于局部逼近的自适应 RBF 控制 .....</b>	<b>176</b>
7.1	基于名义模型的机械臂鲁棒控制 .....	176
7.1.1	系统描述 .....	176
7.1.2	控制器设计 .....	176

# 目录

7.1.3	稳定性分析	177
7.1.4	仿真实例	178
7.2	基于局部模型逼近的自适应 RBF 机械手控制	179
7.2.1	问题描述	179
7.2.2	控制器设计	180
7.2.3	稳定性分析	181
7.2.4	仿真实例	182
7.3	工作空间机械手的神经网络自适应控制	186
7.3.1	关节角位置与工作空间直角坐标的转换	186
7.3.2	机械手的神经网络建模	186
7.3.3	控制器的设计	188
7.3.4	仿真实例	189
附录	仿真程序	192
	参考文献	223
第 8 章	基于 RBF 网络的动态面自适应控制	224
8.1	简单动态面控制的设计与分析	224
8.1.1	系统描述	224
8.1.2	动态面控制器的设计	224
8.1.3	动态面控制器的分析	225
8.1.4	仿真实例	226
8.2	飞行器航迹角自适应神经网络动态面控制	228
8.2.1	系统描述	228
8.2.2	自适应神经网络动态面控制设计	229
8.2.3	稳定性分析	231
8.2.4	仿真实例	235
8.3	柔性关节机械手自适应 RBF 网络动态面鲁棒控制	238
8.3.1	问题描述	238
8.3.2	自适应 RBF 网络动态面控制器设计	239
8.3.3	闭环系统稳定性分析	241
8.3.4	仿真验证	244
附录	仿真程序	247
	参考文献	272
第 9 章	数字 RBF 神经网络控制	274
9.1	自适应 Runge-Kutta-Merson 法	274

9.1.1	引言 .....	274
9.1.2	仿真实例 .....	275
9.2	SISO 系统的数字自适应控制 .....	275
9.2.1	引言 .....	275
9.2.2	仿真实例 .....	276
9.3	两关节机械手的数字自适应 RBF 控制 .....	277
9.3.1	引言 .....	277
9.3.2	仿真实例 .....	277
附录	仿真程序 .....	279
	参考文献 .....	286
第 10 章	离散神经网络控制 .....	<b>287</b>
10.1	引言 .....	287
10.2	一类离散非线性系统的直接 RBF 控制 .....	287
10.2.1	系统描述 .....	287
10.2.2	控制算法设计和稳定性分析 .....	288
10.2.3	仿真实例 .....	290
10.3	一类离散非线性系统的自适应 RBF 控制 .....	294
10.3.1	系统描述 .....	294
10.3.2	经典控制器设计 .....	294
10.3.3	自适应神经网络控制器设计 .....	294
10.3.4	稳定性分析 .....	295
10.3.5	仿真实例 .....	297
附录	仿真程序 .....	301
	参考文献 .....	307
第 11 章	自适应 RBF 观测器设计及滑模控制 .....	<b>309</b>
11.1	自适应 RBF 观测器设计 .....	309
11.1.1	系统描述 .....	309
11.1.2	自适应 RBF 观测器设计 .....	309
11.1.3	仿真实例 .....	311
11.2	基于 RBF 自适应观测器的滑模控制 .....	315
11.2.1	滑模控制器设计 .....	315
11.2.2	仿真实例 .....	316
附录	仿真程序 .....	318
	参考文献 .....	330

# 目录

第 12 章 基于 RBF 神经网络的反演自适应控制 .....	331
12.1 一种二阶非线性系统的反演控制 .....	331
12.1.1 基本原理 .....	331
12.1.2 仿真实例 .....	332
12.2 一种三阶非线性系统的反演控制 .....	333
12.2.1 系统描述 .....	333
12.2.2 反演控制器设计 .....	334
12.2.3 仿真实例 .....	335
12.3 基于 RBF 网络的二阶非线性系统反演控制 .....	337
12.3.1 基本原理 .....	337
12.3.2 RBF 网络原理 .....	338
12.3.3 控制算法设计与分析 .....	338
12.3.4 仿真实例 .....	339
12.4 高阶非线性系统反演控制 .....	340
12.4.1 系统描述 .....	340
12.4.2 反演控制器的设计 .....	340
12.5 基于 RBF 网络的高阶非线性系统自适应反演控制 .....	342
12.5.1 系统描述 .....	342
12.5.2 反演控制律设计 .....	343
12.5.3 自适应律的设计 .....	344
12.5.4 仿真实例 .....	345
附录 仿真程序 .....	347
参考文献 .....	360
第 13 章 基于 RBF 神经网络的自适应容错控制 .....	361
13.1 SISO 系统执行器自适应容错控制 .....	361
13.1.1 控制问题描述 .....	361
13.1.2 控制律的设计与分析 .....	361
13.1.3 仿真实例 .....	362
13.2 基于 RBF 网络的自适应容错控制 .....	363
13.2.1 控制问题描述 .....	363
13.2.2 RBF 神经网络设计 .....	364
13.2.3 控制律的设计与分析 .....	364
13.2.4 仿真实例 .....	365
附录 仿真程序 .....	366

参考文献 .....	373
<b>第 14 章 基于 RBF 神经网络的自适应量化控制 .....</b>	<b>374</b>
14.1 执行器自适应量化控制 .....	374
14.1.1 系统描述 .....	374
14.1.2 量化控制器设计与分析 .....	374
14.1.3 仿真实例 .....	376
14.2 基于 RBF 神经网络的执行器自适应量化控制 .....	377
14.2.1 系统描述 .....	377
14.2.2 RBF 神经网络设计 .....	378
14.2.3 量化控制器设计与分析 .....	378
14.2.4 仿真实例 .....	380
附录 仿真程序 .....	382
参考文献 .....	388
<b>第 15 章 基于 RBF 神经网络的控制输出受限控制 .....</b>	<b>389</b>
15.1 输出受限引理 .....	389
15.2 基于位置输出受限控制算法设计 .....	390
15.2.1 系统描述 .....	390
15.2.2 控制器的设计 .....	391
15.2.3 仿真实例 .....	392
15.3 基于 RBF 神经网络的输出受限控制 .....	394
15.3.1 系统描述 .....	394
15.3.2 RBF 神经网络原理 .....	394
15.3.3 控制器的设计 .....	395
15.3.4 仿真实例 .....	397
附录 仿真程序 .....	398
参考文献 .....	405
<b>第 16 章 基于 RBF 神经网络的控制方向未知的状态跟踪 .....</b>	<b>406</b>
16.1 基本知识 .....	406
16.2 控制方向未知的状态跟踪 .....	406
16.2.1 系统描述 .....	406
16.2.2 控制律的设计 .....	407
16.2.3 仿真实例 .....	407
16.3 基于 RBF 神经网络的控制方向未知的状态跟踪 .....	408
16.3.1 系统描述 .....	408

# 目录

16.3.2 RBF 神经网络设计 .....	409
16.3.3 控制律的设计 .....	409
16.3.4 仿真实例 .....	410
附录 仿真程序 .....	411
参考文献 .....	418

## 1.1 神经网络控制

### 1.1.1 神经网络控制的提出

自从20世纪40年代提出了基于单神经元模型构建的神经网络计算模型<sup>[1]</sup>,神经网络在感知学习、模式识别、信号处理、建模技术和系统控制等方面得到了巨大的发展与应用。神经网络具有高度并行的结构、强大的学习能力、连续非线性函数逼近能力、容错能力以及高效实时模拟VSL能力等优点,极大地促进与拓展了神经网络技术在非线性系统辨识与控制的应用<sup>[2]</sup>。

在实际工业过程中,存在着非线性、未建模动态、不可测噪声以及多回路等问题,这些问题对控制系统设计提出了很大的挑战。

经过几十年的发展,基于现代和经典控制理论的控制策略得到了很大的发展。现代控制理论中的自适应和最优控制技术以及经典控制理论主要都是基于线性系统,然而应用这些技术,都需要发展数学建模技术。

与传统的控制策略相比,神经网络在如下几个方面吸引了广大研究者的注意,概括如下:

(1) 神经网络对任意函数具有学习能力,神经网络的自学习能力可避免在传统自适应控制理论中占有重要地位的复杂数学分析。

(2) 针对传统控制方法不能解决的高度非线性控制问题,多层神经网络的隐含层神经元采用了激活函数,它具有非线性映射功能,这种映射可以逼近任意非线性函数,为解决非线性控制问题提供了有效的解决途径。

(3) 传统自适应控制方法需要模型先验信息来设计控制方案,例如需要建立被控对象的数学模型。由于神经网络的自学习能力,控制器不要许多系统的模型和参数信息,因此,神经网络控制可以广泛用于解决具有不确定模型的控制问题。

(4) 采用神经元芯片或并行硬件,为大规模神经网络并行处理提供了非常快速的多处理技术。

(5) 在神经网络的大规模并行处理架构下,网络的某些节点损坏并不影响整个神经网络的整体性能,有效地提高了控制系统的容错性。

### 1.1.2 神经网络控制概述

针对 MIMO 模型,例如多关节机器人动力学模型,常规控制器的设计方法一般要求建立最小相位系统的结构和精确的数学模型,在许多情况下模型参数还要求精确已知。

神经网络可以通过前向和反向的动态行为在线学习复杂模型,通过适应环境的变化设计自适应 MIMO 控制器。从理论上讲,一个基于神经网络的控制器的设计相对简单,因为它不要求有关该模型的任何先验知识。

神经网络的逼近能力已经被许多研究者证明<sup>[3~7]</sup>,一些研究者在自适应神经网络控制器引入了逼近能力<sup>[8~14]</sup>,一些研究小组发展了自适应神经网络控制稳定性分析技术。

针对神经网络控制已经有许多成果发表。例如,一些研究者针对非线性动态系统的辨识和控制问题,提出了一个统一的框架<sup>[15]</sup>,针对自适应非线性控制和自适应线性控制理论应用参数化方法进行稳定性分析。文献[8]通过引入 Ge-Lee 算子,针对机器人神经网络控制方法进行了稳定性分析和描述。文献[16~18]中给出了基于李雅普诺夫方法的典型神经网络控制系统稳定性分析方法。

反向传播(BP)神经网络和 RBF 神经网络的普及,大大促进了神经网络控制的发展<sup>[19]</sup>。例如,文献[20~28]采用 BP 神经网络进行了控制器的分析和设计。

### 1.1.3 自适应 RBF 神经网络概述

针对 RBF 通用函数逼近的自适应非线性控制研究引起了国内外学者的广泛关注<sup>[29~37]</sup>。RBF 神经网络在系统具有较大不确定性时,能有效地提高控制器的性能。在神经网络控制中,神经网络自适应律可通过 Lyapunov 方法导出,通过自适应权重的调节保证整个闭环系统的稳定性和收敛性。

本书通过许多控制系统设计和仿真实例,来论述当系统受到外界干扰时,采用 RBF 神经网络能够显著改善控制性能。

## 1.2 RBF 神经网络

在 1990 年,研究人员首次提出了非线性动力系统的人工神经网络自适应控制方法<sup>[38]</sup>。此后,多层神经网络(MNN)和径向基函数(RBF)神经网络成功地应用于模式识别和控制中<sup>[39]</sup>。

RBF 神经网络于 1988 年提出<sup>[40]</sup>。相比多层前馈网络(MFN),RBF 网络由于具有良好的泛化能力,网络结构简单,避免不必要的和冗长的计算而备受关注。关于 RBF 网络的研究表明了 RBF 神经网络能在一个紧凑集和任意精度下,逼近任何非线性函数<sup>[41,42]</sup>。目前,已经有许多针对非线性系统的 RBF 神经网络控制研究成果发表<sup>[24,43]</sup>。

RBF 神经网络有 3 层:输入层、隐含层和输出层。隐含层的神经元激活函数由径向基



函数构成。隐含层组成的数组运算单元称为隐含层节点。每个隐含层节点包含一个中心向量  $c$ ,  $c$  和输入参数向量  $x$  具有相同维数,二者之间的欧氏距离定义为  $\|x(t) - c_j(t)\|$ 。

隐含层的输出为非线性激活函数  $h_j(t)$  构成

$$h_j(t) = \exp\left(-\frac{\|x(t) - c_j(t)\|^2}{2b_j^2}\right), \quad j = 1, \dots, m \quad (1.1)$$

其中,  $b_j$  为一个正的标量,表示高斯基函数的宽度;  $m$  是隐含层的节点数量。网络的输出由如下加权函数实现:

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^m w_{ji} h_j(t), \quad i = 1, \dots, n \quad (1.2)$$

其中,  $w$  是输出层的权值;  $n$  是输出节点个数;  $y$  是神经网络输出。

### 1.3 机器人 RBF 神经网络控制

多输入多输出系统(MIMO)模型中的非线性、时变以及模型参数动态变化的控制问题,一直是控制领域的难题。这方面的研究成果已经有很多,如文献[44]针对一类双关节或多关节机械臂的控制问题进行了研究。

机械臂在柔性自动化领域已经成为越来越重要的研究对象,近年来,针对机械臂的控制器设计已取得了许多成果,为了实现精确的轨迹跟踪和良好的控制性能,出现了许多控制方法。

针对机械力臂的控制问题,计算力矩控制方法是最简单的控制方法,但该方法依赖于系统的精确非线性动力学模型。在实际工程中,机械手的有效载荷中可能会发生变化,在其运动期间,该参数无法实现精确预知。为了克服这个问题,许多研究人员引入了自适应控制策略<sup>[45~47]</sup>。

自适应控制方法具有不需要未知参数的先验知识的优点,例如不需要有效载荷的质量。对于刚性机械臂系统,神经网络控制技术已经用于此类系统的研究,例如,采用神经网络自适应控制方法,可设计稳定跟踪控制的刚性连杆机械臂系统<sup>[8~14,48~52]</sup>。

针对柔性机械臂系统,出现了许多神经网络自适应控制方法的解决方案<sup>[53~55]</sup>。例如,文献[53]针对柔性连杆机械臂关节位置跟踪的奇异摄动技术,设计了一个神经网络控制器,该方法不需要机器人机械臂的先验知识,且不需要离线训练神经网络。文献[54]针对连杆柔性臂尖端位置跟踪控制问题,设计了神经网络自适应控制器,不需要有效载荷质量的先验知识。

## 1.4 控制系统 S 函数设计

### 1.4.1 S 函数介绍

S 函数是 Simulink 的重要部分,它为 Simulink 环境下的仿真提供了强有力的拓展能力。S 函数可以用计算机语言来描述动态系统。在控制系统设计中,S 函数可以用来描述控制算法、自适应算法和模型动力学方程。