

基于遗传神经网络的 倒立摆控制研究

J

IYU YICHUAN SHENJING WANGLUO DE
DAOLIBAI KONGZHI YANJIU

黄孝平◎著



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

基于遗传神经网络的 倒立摆控制研究

黄孝平 著

重庆大学出版社

内 容 提 要

倒立摆系统是一个高阶次、不稳定、多变量、非线性、强耦合的典型系统,是控制领域重要的研究对象,是验证各种控制算法的理想模型。很多抽象的概念如系统的稳定性、可控性、可观性、鲁棒性和系统的抗干扰能力等,都可以通过对倒立摆的控制直观地表现出来。

本研究将遗传算法和神经网络结合起来,提出了面向神经网络的遗传算法(NNOGA),详细论述了该算法的实现途径,并用基于遗传神经网络的智能控制方法实现了对一、二、三级直线倒立摆系统的仿真和智能控制,克服了简单遗传算法搜索速度慢、不成熟收敛和迭代次数多的缺点,取得了较好的控制效果。

图书在版编目(CIP)数据

基于遗传神经网络的倒立摆控制研究/黄孝平著.

—重庆:重庆大学出版社,2014.6

ISBN 978-7-5624-8282-6

I. ①基… II. ①黄… III. ①智能控制—研究 IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第21820号

基于遗传神经网络的倒立摆控制研究

黄孝平 著

策划编辑:彭 宁 何 梅

责任编辑:杨粮菊 版式设计:彭 宁 杨粮菊

责任校对:关德强 责任印制:张 策

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路21号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址: <http://www.cqup.com.cn>

邮箱: fxk@cqup.com.cn (营销中心)

全国新华书店经销

重庆川外印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:7.75 字数:96千

2014年6月第1版 2014年6月第1次印刷

ISBN 978-7-5624-8282-6 定价:38.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

序一

智能控制是一门新兴的交叉学科,具有非常广泛的应用领域。智能控制是 20 世纪 60 年代由 Leondes 和 Mendel 首先使用,1971 年著名美籍华人科学家傅京孙教授从发展学习控制的角度,首次正式提出智能控制学科与建立智能控制理论的构想。

神经网络是智能控制领域的一个重要分支,自从 20 世纪 40 年代 McCulloch 和 Pitts 提出形式神经元的数学模型以来,神经网络的研究开始了它艰难的历程。20 世纪 20 年代至 80 年代专家系统和人工智能技术的发展相当迅速,但仍有不少学者致力于神经网络模型的研究。如 Albus 在 1975 年提出 CMAC 神经网络模型,利用人脑记忆模型提出了一种分布的联想查表系统,Grossberg 在 1976 年提出的自共振理论解决了无导师指导下的模式分布。到了 20 世纪 80 年代,人工神经网络进入了飞速发展时期。1982 年 Hopfield 提出了 HNN 模

型,解决了回归网络的学习问题。1986年PDP小组的研究人员提出的多层前向传播神经网络的BP学习算法,实现了有导师指导下的网络学习,从而为神经网络的应用开辟了广阔的前景。神经网络在许多方面试图模拟人脑的功能,并不依赖于精确的数学模型,因而显示出强大的自学习和自适应功能。神经网络在机器人方面的许多研究成果显示出了广泛的应用前景。

遗传算法(Genetic Algorithms)是人工智能的重要新分支,是一种基于自然选择和基因遗传学原理的优化搜索方法,在计算机上模拟生命进化机制而发展起来的一门新学科。GA由美国J.H.Holland在1975年提出,从20世纪80年代中期随着人工智能的发展和计算机技术的进步逐步成熟,应用日趋广泛。遗传算法抽象和严谨地解释自然界的适应过程,将自然生物系统的重要机理运用到工程系统、计算机系统和商业系统等人工系统的设计中。遗传算法具有全局寻优的能力,能够在复杂空间进行全局优化搜索,并且具有较强的鲁棒性。很多用常规优化算法能有效解决的问题,采用遗传算法寻优技术往往能得到更好的优化效果,其应用领域涉及函数优化、自动控制、图像识别、机器学习等,正在向其他领域渗透,形成一种与神经

网络、模糊控制等技术结合的新型智能控制系统整体优化的结构形式,并显示出了诱人的前景。

倒立摆系统控制与火箭飞行、飞行器和起重机起重臂等的控制问题都有一定的相似性,倒立摆系统的控制研究对这些控制问题的研究有着很大的促进作用。

作为黄孝平曾经的师长,看到他多年来一直孜孜以求地进行倒立摆系统的智能控制研究,并取得了一定的成果,心里感到由衷的高兴。作此序一是勉励,二是期待他在遗传算法、神经网络的研究中取得更大的成绩。

周德俭

2014 年 3 月

序言作者系桂林电子科技大学正厅级调研员,博士,教授。历任桂林工学院副院长、广西科技大学校长,现任西安电子科技大学和桂林电子科技大学博士研究生导师。

序二

倒立摆作为一个多变量、非线性、不稳定的典型系统,是控制领域重要的研究对象,是验证各种控制算法的理想模型;很多抽象的概念如系统的稳定性、可控性、可观性、鲁棒性和系统的抗干扰能力等,都可以通过对倒立摆的控制直观地表现出来。

倒立摆系统最初研究开始于 20 世纪 50 年代,麻省理工学院(MIT)的控制论专家们根据火箭发射的原理设计出了一级倒立摆实验装置。随着对智能控制研究逐渐深入,模糊控制、神经网络、拟人智能控制、遗传算法等越来越多的智能控制方法应用于倒立摆系统的控制上。倒立摆系统在检验不同的控制方法对各种复杂的、不稳定的、非线性系统的控制效果中得到广泛的应用,并且越来越受到世界各国科研工作者的重视。

倒立摆的控制模型与直立行走机器人的平衡控制、两轮小车的自平衡控制、导弹拦截

控制、火箭发射时的垂直控制、卫星飞行中的姿态控制和航空对接控制等涉及平衡和角度的控制问题非常相似,所以在机器人、航天、军工等领域和一般的工业过程中都有着广泛地应用。倒立摆系统作为研究控制理论的一种典型的实验装置,具有较为简单的结构、可以有效地检验众多控制方法的有效性、参数和模型易于改变、相对低廉的成本等优点,研究控制理论的很多科研人员一直将它们视为主要的研究对象,用它们来描述线性控制领域中不稳定系统的稳定性以及在非线性控制领域中的无源性控制、变结构控制、非线性观测器、自由行走、非线性模型降阶、摩擦补偿等控制思想,且从中不断开发出新的控制方法和控制理论,所以倒立摆系统是研究智能控制方法较为理想的实验装置。倒立摆系统自身是一个典型的多变量、非线性、高阶次、强耦合和绝对不稳定系统,许多抽象的控制概念如系统的可控性、稳定性、系统的抗干扰能力和系统的收敛速度等,都可以由倒立摆系统直观地展示出来。此外,通过倒立摆系统还可以研究非线性观测器、变结构控制、目标定位控制、摩擦补偿和混合系统等。

多年来,作为一名从事倒立摆系统智能控制研究的科研工作者,衷心希望黄孝平同志在运用遗传算法、神经网络实现多级倒立摆的控

制研究中,能取得更多的研究成果,运用到高校的控制理论教学和实验中,并将之运用到自动控制领域的生产实践中,以期产生更大的效益,推动广西北部湾地区经济社会的快速发展。

牛秦州

2014 年 4 月

序言作者系桂林理工大学信息科学与工程学院党委书记,博士,教授。主要研究是嵌入式系统和人工智能控制。

前言

倒立摆的控制是控制理论应用的一个典型范例。倒立摆系统作为一个非最小相位、强耦合、多变量的绝对不稳定非线性系统,通常被用来检验控制策略的有效性;同时,由于倒立摆系统控制与火箭和飞行器控制以及起重机起重臂控制等的相似性,对其进行控制所采用的控制算法,以及得出的结论对其他工程控制问题具有一定指导意义。

当前,遗传算法和神经网络以及二者的结合研究都是智能控制技术研究中的热点。神经网络能够充分逼近任意复杂的非线性关系,能够学习不确定性系统的动态特性,用神经网络设计的控制系统,适应性、鲁棒性均较好,能够处理高维数、非线性、强干扰、不确定、难建模的复杂控制问题。而遗传算法是一种具有极高鲁棒性和广泛适用性的全局优化方法,采用遗传算法学习的神经网络控制器兼有神经网络的广泛映射能力和遗传算法快速收敛以

及增强式学习等性能。

本研究将神经网络和遗传算法结合起来,对一、二、三级倒立摆装置进行仿真和智能控制研究,主要包括:

推导出了一、二、三级倒立摆系统的非线性数学模型,并用基于遗传神经网络的智能控制方法对倒立摆系统进行了仿真;设计了反向传播算法神经网络控制器,对倒立摆控制效果较好,解决了用常规控制方法存在的控制范围小,控制精度低的问题;改进遗传算法的神经网络控制器的设计,解决了 BP 算法收敛速度慢的问题,避免 BP 算法易陷入局部极小的缺点;提出了面向神经网络的遗传算法(NNOGA),详细论述了该算法的实现,克服了简单遗传算法搜索速度慢、不成熟收敛和迭代次数多的缺点。

2014 年 3 月

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 智能控制理论概述	3
1.3 神经网络理论概述	5
1.4 研究内容及意义	7
1.4.1 研究的内容	7
1.4.2 研究的意义	8
第 2 章 基于神经网络的智能控制	9
2.1 引言	9
2.2 神经网络结构	10
2.2.1 人工神经元的数学模型	10
2.2.2 神经网络常用的激发函数	11
2.2.3 神经网络的基本特性	13
2.2.4 神经网络的基本结构	13
2.3 神经网络的学习算法	15
2.3.1 学习方式和学习规则	15
2.3.2 BP 网络学习算法	17
2.4 神经网络控制的基本结构	20

2.5	神经网络控制系统结构	21
2.5.1	NN 学习控制	21
2.5.2	NN 直接逆模型控制	22
2.5.3	NN 自适应控制	23
2.6	小结	25
第 3 章	遗传神经网络及其控制算法	26
3.1	遗传算法	26
3.1.1	遗传算法的工作机理	26
3.1.2	GA 的特点	27
3.1.3	遗传算法的基本问题	28
3.1.4	GA 的理论研究概况	30
3.2	遗传算法的改进	31
3.2.1	改进的基本方法	32
3.2.2	编码方式的改进	32
3.2.3	评价函数	32
3.2.4	初始化过程	33
3.2.5	遗传算子的改进	34
3.2.6	面向神经网络的遗传算法的步骤	36
3.3	改进 GA 的神经网络控制器设计	37
3.3.1	前馈神经网络的结构	37
3.3.2	前馈神经网络设计	39
3.3.3	改进 GA 的神经网络控制器设计	41

3.3.4	用 NNOGA 训练 NN 权值的步骤	41
3.3.5	用 NNOGA 训练 NN 权值的程序框图	42
3.3.6	用 NNOGA 训练 NN 权值的数据结构	43
3.3.7	用 NNOGA 训练 NN 权值的程序	43
3.4	小结	44
第 4 章	倒立摆系统及控制研究	45
4.1	一级倒立摆的控制模型	45
4.1.1	系统的结构	45
4.1.2	系统的数学模型	46
4.2	二级倒立摆的控制模型	46
4.2.1	系统的结构	46
4.2.2	二级倒立摆的数学模型	47
4.2.3	二级倒立摆系统的参数说明	48
4.3	三级倒立摆的数学模型	49
4.3.1	系统的结构	49
4.3.2	系统的参数说明	49
4.3.3	数学模型推导	50
4.4	倒立摆控制系统仿真的实现原理	55
4.4.1	一级倒立摆的控制仿真	56

4.4.2	二级倒立摆的控制仿真	58
4.4.3	三级倒立摆的控制仿真	60
4.4.4	仿真结果分析	66
4.5	小结	67
第 5 章	用遗传神经网络改进倒立摆的控制	68
5.1	引言	68
5.2	神经网络建模与控制	69
5.2.1	一级倒立摆的神经网络控制器	69
5.2.2	BP 神经网络控制二级倒立摆	72
5.3	基于改进遗传算法的神经网络 对倒立摆的控制	85
5.3.1	一级倒立摆的神经网络控制器	85
5.3.2	二级倒立摆的神经网络控制器	94
5.3.3	三级倒立摆的神经网络控制器	96
5.4	小结	98
第 6 章	总结与展望	100
参考文献		103

第 **I** 章

绪 论

1.1 引 言

倒立摆系统的控制是控制理论应用的一个典型范例。倒立摆系统结构简单、成本较低,便于用模拟或数字的方法进行控制。虽然其结构形式多种多样,但无论何种结构,就其本身而言,都是一个非最小相位、多变量、绝对不稳定的非线性系统。由于倒立摆系统的绝对不稳定,必须选用有效的方法稳定它。其控制方法在军工、航天、机器人和一般工业过程领域中都有着广泛的用途,如机器人行走过程中的平衡控制、火箭发射中的垂直度控制和卫星飞行中的姿态控制等均涉及倒置问题。同时,由于摩擦力的存在,该系统具有一定的不确定性。对这样一个复杂系统的研究,从理论上将涉及系统控制中的很多关键问题:如非线性问题、鲁棒性问

题、镇定问题、随动问题以及跟踪问题等。

对倒立摆系统的控制研究引起国内外学者广泛关注的原因不仅仅在于以上因素。新的控制方法的不断出现,人们试图通过倒立摆这样一个严格的控制对象,检验新的控制方法是否有较强的处理多变量、非线性和绝对不稳定性的能力。也就是说,倒立摆系统控制作为控制理论研究中的一种较为理想的实验手段通常用来检验控制策略的有效性。

随着控制理论的不断向前发展,越来越多的非线性控制理论被成功运用于倒立摆系统的控制,如逆系统方法、神经网络(Neural Network, NN)方法、 H^∞ 控制方法等。其中,人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)以其独特的优点在控制界得到迅猛发展,由于ANN能够充分逼近任意复杂的非线性关系和能够学习严重不确定性系统的动态特性,这些特点显示了ANN在解决高度非线性和严重不确定性系统的控制方面的巨大潜力,非线性问题的研究成了NN理论发展的一个最大动力,同时也成了NN所面临的最大挑战。然而,NN也有许多亟待完善之处,NN的学习速度一般比较慢,为满足实时要求,必须加以改进。

该书采用人工智能中另一迅速发展的分支——遗传算法(Genetic Algorithm, GA)与NN相结合的算法。GA是一种较成熟的具有极高鲁棒性和广泛适用性的全局优化方法。标准遗传算法[或简单遗传算法(Simple Genetic Algorithms, SGA)]有搜索速度慢、不成熟收敛和迭代次数多等缺点,因而需要采用高级遗传算法[改进遗传算法(Improved Genetic Algorithms, IGA)]。

由于GA不受问题性质(如连续性、可微性)的限制,能够处理传统优化算法难以解决的复杂问题等优点,显示了它在控制系统优化方面的巨大潜力,因而引起了控制领域的极大关注。近年来,在自动控制领域,GA在PID控制、线性和非线性、最优、鲁棒、自适应、滑模、模糊逻辑、神经网络