



神经元网络及其控制系统

舒怀林 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

PID 神经元网络及其 控制系统

舒怀林 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

PID 神经网络及其控制系统/舒怀林编著. —北京:国防工业出版社, 2006. 2

ISBN 7-118-04325-7

I. P... II. 舒... III. 神经网络—PID 控制—研究
IV. TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 010456 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 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 10½ 字数 236 千字

2006 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 25.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

作者 1997 年提出了 PID 神经网络及其控制系统以来,由于在多个杂志和学术会议上的介绍,以及其他一些控制界学者进行的后续研究和应用工作,PID 神经网络已经逐步引起了学术界和工程应用界的关注,作者不断收到一些进行相关研究的同行的意见和询问,特别是关于网络实现和训练时的具体问题。由于学术论文的篇幅有限,有关介绍难免挂一漏万,因此现将有关 PID 神经网络的研究结果,以专著的形式详细予以介绍,希望能对关心、研究和应用 PID 神经网络的同行们一些帮助,促进 PID 神经网络控制系统的完善和发展。

PID 神经网络的价值之一在于提出了新的思路,它将静态的神经元扩充到动态的神经元,特别是将 PID 特性赋予了神经元,这种扩充将大大丰富人工神经网络的内涵。PID 神经网络的价值之二在于它立足于实用性,PID 神经网络的结构、连接权重初值的选取都是基于“应用”这个现实的问题。PID 神经网络的价值之三在于它对多变量系统良好的控制性能,为解决多变量系统控制问题提出了新的工具。

撰写本书力图体现理论与实用相结合的原则,除基本理论的阐述以外,还用了大量的篇幅介绍系统仿真结果、算法核心结构和程序、几种常用软件平台上的应用,介绍了部分应用成果,使读者能够较容易地掌握有关编程和应用方法。

本书共分 10 章。第 1 章是绪论,首先分析了传统控制方法对复杂系统控制的局限性,分析了神经网络尚未广泛应用于控制系统的核心问题。介绍了神经网络与 PID 控制结合的研究状况和存在问题,介绍了 PID 神经网络的基本概念、特点以及作者的主要创新点。第 2 章引入了比例神经元、积分神经元和微分神经元,研究了它们的生物背景,给出了计算公式。第 3 章在分析一般多层前向神经网络的特点和缺陷的基础上,结合神经网络和 PID 控制规律的优点,建立了 PID 神经网络。第 4 章研究 PID 神经网络进行系统辨识的理论基础,介绍 PIDNN 进行系统辨识的基本结构,通过系统辨识实例来验证 PIDNN 的性能。第 5 章通过理论分析和计算机仿真,研究 PID 神经网络的基本形式 SPIDNN 构成的控制系统的性能和有关问题。第 6 章研究 PID 神经网络的多输出形式 MPIDNN 及其构成的多变量控制系统,包括网络结构、算法,收敛性、稳定性证明。第 7 章利用 PID 神经网络实时仿真程序包,进行各种类型多变量系统的仿真,通过仿真结果证明 MPIDNN 的优良特性。第 8 章分别介绍由结构化程序设计语言 Visual Basic、虚拟仪器设计平台 LABVIEW、工控组态软件 MCGS 设计 PID 神经网络程序的基本思路和主要步骤。第 9 章是应用篇,介绍了研究者们对多个实际对象,进行 PID 神经网络控制的仿真和实际应用实例。第 10 章是总结和展望。

本书第 8 章和第 9 章部分内容摘自参考文献,谨在此向相关作者表示感谢。

本书的研究工作得到了广州市科研计划项目和广州市教育局科研项目经费资助。

由于作者水平有限,本书涉及的内容较广,PID 神经元网络尚处于发展完善过程中,一些新的提法和观点可能有不妥之处,敬请广大读者批评指正,欢迎进行交流和探讨。

作者

2005 年 12 月于广州大学

作者声明

包含比例、积分、微分神经元的 PID 神经元网络是作者首先于 1997 年提出,并首先发表学术论文,作者作为发明人的 PID 神经元网络已经获得了国家发明专利。但近来发现有人抄袭作者已发表论文的部分甚至全篇内容,且未标明引用出处。作者在此强烈谴责这些侵犯知识产权的剽窃行为并保留追究其法律责任的权利。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 传统控制理论的局限性	1
1.2 人工神经网络控制系统的特点和弱点	2
1.3 PID 控制的特点及其和神经网络的结合	3
1.3.1 传统 PID 控制的特点	4
1.3.2 神经网络和 PID 控制相结合的研究现状	4
1.4 PID 神经网络(PIDNN)的特点和结构形式	6
1.4.1 PIDNN 的特点	6
1.4.2 PIDNN 的结构形式	7
1.5 对 PIDNN 所做的主要工作和创新点	8
第 2 章 比例、积分、微分(PID)神经元	10
2.1 生物神经元的特性及 PID 机能	10
2.2 PID 神经元的结构形式和计算方法	13
2.2.1 神经元的基本模型结构形式	13
2.2.2 PID 神经元的计算方法	15
2.3 小结	20
第 3 章 PID 神经网络	21
3.1 引言	21
3.2 一般前向神经网络的特性和缺陷	21
3.3 PIDNN 的基本形式——SPIDNN	23
3.3.1 SPIDNN 的结构形式	23
3.3.2 SPIDNN 的前向算法	23
3.3.3 SPIDNN 的反传算法	25
3.4 多输出 PIDNN——MPIDNN	28
3.4.1 MPIDNN 的结构形式	28
3.4.2 MPIDNN 前向算法	29
3.4.3 MPIDNN 的反传算法	31
3.5 PIDNN 连接权重初值的选取和等价系统	34
3.5.1 神经网络连接权重初值选取的重要性	34
3.5.2 SPIDNN 的连接权重初值选取和等价系统	35
3.5.3 MPIDNN 的连接权重初值选取和等价系统	36
3.6 小结	38

第4章 基于PID神经网络的非线性系统辨识	39
4.1 引言	39
4.2 PIDNN进行系统辨识的理论基础	39
4.3 PIDNN进行系统辨识的结构分析	43
4.4 PIDNN的系统辨识程序	45
4.5 PIDNN进行非线性动态系统辨识实例	45
4.5.1 单变量非线性动态系统辨识	45
4.5.2 多变量非线性动态系统辨识	48
4.6 小结	50
第5章 PID神经网络单变量控制系统	52
5.1 引言	52
5.2 SPIDNN控制系统的结构和算法	52
5.2.1 SPIDNN控制系统的结构	52
5.2.2 SPIDNN控制器的前向计算方法	52
5.2.3 SPIDNN控制器的反传学习计算方法	54
5.3 SPIDNN单变量控制系统的稳定性分析	57
5.4 SPIDNN单变量控制系统仿真结果	63
5.4.1 线性单变量系统的控制	63
5.4.2 带时延单变量系统的控制	66
5.4.3 非线性时变单变量系统的控制	68
5.5 小结	72
第6章 PID神经网络多变量控制系统理论	73
6.1 多变量系统控制的特点和问题	73
6.2 PIDNN多变量控制系统的结构和算法	76
6.2.1 PIDNN多变量控制系统的结构	76
6.2.2 PIDNN多变量控制系统的前向计算方法	77
6.2.3 PIDNN多变量控制系统的反传计算方法	78
6.3 PIDNN多变量控制系统的收敛性和稳定性分析	82
6.4 小结	86
第7章 PID神经网络多变量控制系统仿真	87
7.1 线性多变量控制系统的控制	87
7.1.1 线性强耦合二变量一阶系统的控制	87
7.1.2 线性强耦合三变量一阶系统的控制	92
7.2 带时延强耦合多变量系统的控制	94
7.2.1 大时延多变量线性系统的控制	94
7.2.2 大时延多变量复杂结构系统的控制	97
7.3 非线性强耦合多变量系统的控制	98
7.3.1 非线性二变量系统1的控制	99
7.3.2 非线性多变量系统2的控制	100

7.3.3 非线性时变多变量系统的控制	101
7.4 时变强耦合多变量系统的控制	102
7.4.1 线性多变量时变系统的控制	103
7.4.2 非线性时变多变量系统的控制	105
7.5 输入—输出非对称多变量系统的控制	107
7.6 小结	109
第8章 常用软件平台上的PIDNN程序设计	111
8.1 基于VB的PIDNN控制系统仿真程序	111
8.1.1 程序结构	111
8.1.2 主要程序	113
8.2 基于虚拟仪器LABVIEW的PIDNN程序设计	116
8.2.1 虚拟仪器LABVIEW简介	116
8.2.2 PIDNN算法在LABVIEW中的模块化结构	117
8.2.3 程序界面的设计	118
8.2.4 LABVIEW中功能模块的编程	120
8.3 基于MCGS组态软件的PIDNN控制	126
8.3.1 MCGS组态软件简介	126
8.3.2 PIDNN算法的实现	127
第9章 PID神经网络控制系统的应用	133
9.1 基于以太网的PIDNN及其对加热炉的控制	133
9.2 船用柴油机PIDNN控制系统	135
9.3 采用双输出PIDNN控制的变风量空调系统	136
9.4 采用四输出PIDNN控制的变风量空调系统	138
9.5 基于PIDNN的冷连轧板形板厚多变量系统的控制	140
9.6 PIDNN对小车倒立摆的控制	142
9.7 注塑机料筒多段温度PIDNN解耦控制系统	143
9.8 小结	146
第10章 总结与展望	147
10.1 总结	147
10.2 展望	149
参考文献	150

第1章 绪论

本章首先分析了传统控制方法对复杂系统控制的局限性,分析了神经网络尚未广泛应用于控制系统的核心问题。同时,分析了PID控制的特点以及改进PID控制的措施,特别介绍了神经网络与PID控制结合的研究状况和存在问题,然后,在以上分析的基础上,介绍了PID神经网络的基本概念及其特点。

1.1 传统控制理论的局限性

自20世纪40年代以来,传统控制理论得到了快速的发展,形成了完整的理论体系和控制系统的大规模产业化。20世纪70年代以来的近30年中,为了解决航天、军事、工业、社会系统等复杂的控制任务,控制理论以科学史上前所未有的速度经历了现代控制理论和大系统理论两个重要的发展阶段,但是,它对精确数学模型的依赖性,使其应用受到很大的限制。无论是现代控制理论还是大系统理论,其分析、综合和设计都是建立在严格和精确的数学模型基础之上的。而在科学技术和生产力水平高速发展的今天,人们对大规模、复杂和不确定性系统实行自动控制的要求不断提高。因此,传统的基于精确数学模型的控制理论的局限性日益明显。

被控对象的复杂性表现为:模型的不确定性,高度非线性,分布式的传感器和执行器,动态突变,多时间标度,复杂的信息模式,庞大的数据量,以及严格的特性指标。环境的复杂性是以其变化的不确定和难以辨识为特征的。在传统的控制中,往往只考虑控制系统和受控对象所组成的“独立”体系,忽略了环境所施予的影响,而现在的大规模复杂的控制和决策问题,必须把外界环境和对象,以及控制系统作为一个整体来进行分析和设计。

对于控制任务或控制目标,以往都着眼于用数学语言进行描述,这种描述经常是不精确的。实际上,控制任务和目标有多重性(多目标)和时变性,一个复杂任务的确定,需要多次的反复,而且还包括任务所含信息的处理过程,也即任务集合的处理。

传统的控制理论都是建立在以微分和积分为工具的精确模型之上的。迄今为止,还不存在一种直接使用工程技术用语描述系统和解决问题的方法。从工程技术用语到数学描述的映射过程中,一方面虽使问题作了很多简化,但另一方面却使原问题丢失很多信息。

传统控制理论在具体控制系统中的局限性,主要表现在以下几个方面:

(1) 不适应不确定性系统的控制。传统控制是基于模型的控制,即认为控制、对象及干扰的模型是已知的或者是经过辨识可以得到的。但是,由于被控系统的结构和参数往往难以测量或辨识,很多被控系统的结构和参数还具有不确定性,甚至常常会发生突

变。对于这些未知、不确定或知之甚少的被控系统，难以建立数学模型，因而使采用传统控制理论无法实现有效的控制。

(2) 不适应非线性系统的控制。一般被控系统都具有非线性特性，当非线性特性的影响较小时，传统控制理论通常将其近似线性化后设计控制器。当被控系统具有高度非线性特性时，在传统控制理论中虽然也有一些方法可资利用，但只是针对一些具体问题，有较多的附加条件，大多数过于复杂而难以实际运用。

(3) 不适应时变系统的控制。实际被控系统的结构和参数随时间而发生变化，绝对不变的系统是不存在的。当这种变化较小时，经过一系列的近似后，才能利用传统控制理论进行系统综合。如果时变因素较大，传统控制理论则无法应用。

(4) 不适应多变量系统的控制。多变量系统的控制问题一直是控制理论界和控制工程界研究的重点和难点问题，多变量系统除了与单变量系统一样存在着不确定性、非线性和时变问题以外，还存在着系统各要素间相互耦合、互相制约等特殊的问题。如果多变量系统为线性时不变而且结构和参数已知，还可以应用传统控制理论设计解耦器和控制器，对多变量系统进行控制。如果以上条件不成立，传统控制理论则无法应用。而在实际中，这些条件一般很难满足。

传统的控制理论虽然也有办法对付控制对象的不确定性和复杂性，如自适应控制和鲁棒(Robust)控制也可以克服系统中所包含的不确定性，达到优化控制的目的。但是自适应控制是以自动调节控制器的参数，使控制器与被控对象和环境达到良好的“匹配”，以削弱不确定性的影响为目标的。从本质上说，自适应和自校正控制都是通过对系统某些重要参数的估计，以补偿的方法来克服干扰和不确定性。它较适合于系统参数在一定范围内的慢变化情况。鲁棒控制则是在一定的外部干扰和内部参数变化作用下，以提高系统的不灵敏度为宗旨来抵御不确定性的。根据这一思想和原理所导出的算法，其鲁棒的区域是很有限的。

因此，在实际应用中，尤其在工业过程控制中，由于被控对象的严重非线性，数学模型的不确定性，系统工作点变化剧烈等因素，自适应和鲁棒控制存在着难以弥补的严重缺陷，其应用的有效性受到很大的限制，这就促使人们提出新的控制技术和方法。

1.2 人工神经网络控制系统的特点和弱点

智能控制是人工智能、自动控制理论、计算机技术、运筹学等领域的许多学科知识交叉结合而成的，包括模糊控制、专家系统控制、神经网络控制等方法。尽管智能控制尚需进一步完善和发展，但在复杂系统的控制中已经显示出其在很多方面较之传统控制更好的性能。智能控制的概念和原理主要是针对被控对象、环境、控制目标或任务的复杂性而提出来的。而计算机科学、人工智能、信息科学、思维科学、认知科学和人工神经网络的连接机制等方面的新进展和智能机器人的工程实践，从不同的角度为智能控制的诞生奠定了必要的理论和技术基础。与传统的控制理论相比，智能控制对于环境和任务的复杂性有更大的适配程度。它不仅是对建立的模型，而且对环境和任务能抽取有多级的描述精度，进而发展了自学习、自适应和自组织等概念，所以能在更广泛的领域中获得应用。

神经网络是智能控制的一个重要分支,神经网络是以大脑生理研究成果为基础,模拟大脑的某些机理与机制,由人工建立的以有向图为拓扑结构的网络,它通过对连续或断续的输入做状态响应而进行信息处理;神经网络是本质性的并行结构,并且可以用硬件实现,它在处理对实时性要求很高的自动控制问题显示出很大的优越性;神经网络是本质性的非线性系统,多层神经网络具有逼近任意函数的能力,它给非线性系统的描述带来了统一的模型;神经网络具有很强的信息综合能力,它能同时处理大量不同类型的输入信息,能很好地解决输入信息之间的冗余问题,能恰当地协调互相矛盾的输入信息,可以处理那些难以用模型或规则描述的系统信息。神经网络在复杂系统的控制方面具有明显的优势,神经网络控制和辨识的研究已经成为智能控制研究的主流。

基于神经网络的智能控制系统也称作基于连接机制的智能控制系统。随着人工神经网络(ANN)研究的进展,神经网络越来越多地应用于控制领域的各个方面。从过程控制、机器人控制、生产制造、模式识别直到决策支持都有许多应用神经网络的例子。它在系统的辨识、建模、自适应控制中特别受到重视,尤其是它较好地解决了具有不确定性、严重非线性、时变和滞后的复杂系统的建模和控制问题。但是,不能不看到,在ANN实际应用的同时,有关系统的稳定性、能控性、能观性等理论问题,有关ANN控制系统系统化设计方法问题,ANN的拓扑结构问题,以及ANN与基于规则的系统有机结合问题,还有待于进一步研究和发展,一般神经网络的弱点,制约了其在控制系统中的广泛应用,包括以下问题:

(1) 一般神经网络的收敛速度很慢,训练和学习时间很长,这是大多数控制系统所不能接受的。

(2) 在构成控制器时,一般神经网络的结构选取,特别是隐含层单元个数的选取尚无定则,还需要通过反复试验才能确定,这给实际应用带来困难。

(3) 一般神经网络连接权重初值多被取为随机数,存在陷入局部极小值的可能,使控制性能难以达到预期的效果;特别是由于连接权重值的随机性,很难保证控制系统初始运行的稳定性,而如果控制系统初始运行不稳定,失去了应用的基础。

(4) 传统神经网络的结构、参数和机能,难以与控制系统所要求的响应快、超调小、无静差等动态和静态性能指标相联系。

(5) 传统神经网络在构成控制器时,为了满足系统性能要求,大量增加隐含层神经元个数,网络的计算量很大,使在当前的技术水平下很难保证控制的实时性。

(6) 具有任意函数逼近能力的多层前向神经网络是应用最多的一种神经网络,但传统的多层前向神经网络的神经元仅具有静态输入—输出特性,在用它构成控制系统时必须附加其他动态部件。

1.3 PID 控制的特点及其和神经网络的结合

综上所述,传统控制方法和传统的神经网络均不能单独胜任复杂系统的控制任务,需要研究新的更有效的控制方法。新方法产生的一个重要途径就是将现有的多种方法进行综合,通过它们的有机结合来取长补短。

1.3.1 传统 PID 控制的特点

按偏差的比例、积分、微分(PID)控制是历史最悠久、生命力最强的控制方式,尽管出现了很多新的控制方法,但目前正在运行的控制回路中,90%以上还是PID控制器。

PID 控制系统的结构如图 1.1 所示,其中虚线框内为 PID 控制器。PID 控制器的输出值 $v(t)$ 取决于系统给定值 $r(t)$ 和系统输出值 $y(t)$ 的偏差 $e(t)$ 、偏差的积分、偏差的微分的线性加权组合,即

$$v(t) = K_P \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (1-1)$$

式中: T_I 为积分时间常数; T_D 为微分时间常数; K_P 为比例系数; $K_I = K_P / T_I$ 为积分系数; $K_D = K_P T_D$ 为微分系数。

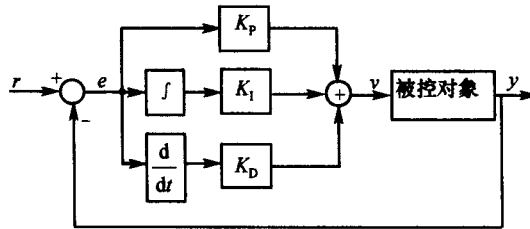


图 1.1 PID 控制系统结构框图

在PID控制器中,比例部分产生与偏差成正比的输出信号,以便消除偏差;积分部分产生与偏差的积分值成正比的输出信号,以便消除系统的静态误差;微分部分产生与偏差的变化率成正比的输出信号,以便加快控制器的调节速率,缩短过渡过程时间,减少超调。如果这三个部分配合适当,便可得到快速敏捷、平稳准确的调节效果。

因此,PID控制器的设计关键问题是如何选择比例、积分和微分系数,而这些参数的整定的困难使PID控制器的应用收到限制。实际上,PID控制规律是一种线性的控制规律,它也具有传统控制理论的弱点,仅在简单的线性单变量系统中有较好的控制效果,而在复杂系统的控制中效果不佳。

1.3.2 神经网络和 PID 控制相结合的研究现状

为了克服传统PID控制的弱点,控制界已经提出了大量的对PID控制的改进方案,例如自校正PID控制、广义预测PID控制、模糊PID控制、专家PID控制、智能PID控制等等。以上各种方案的理论依据不同,采用手段也不相同,但它们的共同点都是针对如何选取和整定PID参数,都是在保持传统PID控制器结构的基础上,采用新的方法在线或离线确定PID参数。这些方法在一定程度上提高了PID控制器的性能,但这些方案一般是针对某些具体问题,缺乏通用性,附加的结构或算法也增加了控制器的复杂性,使它们的广泛应用受到限制。

近年来,随着神经网络的研究和应用,人们开始采用神经网络和PID控制相结合,以便改进传统PID控制的性能,这种将神经网络和PID控制相结合的研究已经得到

了一些结果。

目前已经提出的神经网络和PID控制相结合的方法可以归结为两种类型：①采用神经网络确定PID参数；②单神经元结构PID控制器。这两种类型分别具有各自的特点和不足之处，如下所述：

1. 采用神经网络确定 PID 参数

这种方法和上述其他改进方案的出发点类似，是在传统的 PID 控制器的基础上附加一个或多个神经网络，利用神经网络的学习功能确定和调整 PID 参数，其结构如图 1.2 所示。

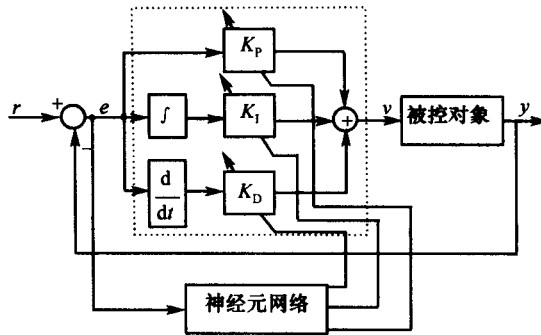


图 1.2 神经网络和 PID 控制现有结合方式一

由图 1.2 可知，此控制器分为两个部分：一部分为虚线内部分，按传统 PID 控制器的结构，对系统偏差信号进行比例、积分和微分处理并加权重相加，这些权重值即为比例、积分和微分系数；另一部分则为神经网络，一般采用多层前向网，此网络根据系统的输入和输出信息，通过反复的学习和调整，提供第一部分所需的 PID 参数。

这种方法的主要缺点之一是它的结构比传统 PID 控制器要复杂的多，实现的难度和代价较大；主要缺点之二是其不能避免一般神经网络的弱点，如收敛速度慢、易陷入局部最小点、隐层单元个数和连接权重初值难以确定，等等。

2. 单神经元结构 PID 控制器

单神经元结构 PID 控制系统的结构如图 1.3 所示，虚线内为单神经元网络，它不承担比例、积分、微分处理工作，它的输入信号分别为系统偏差、偏差的积分和微分，单神经元的输入权重值一一对应比例、积分、微分系数。

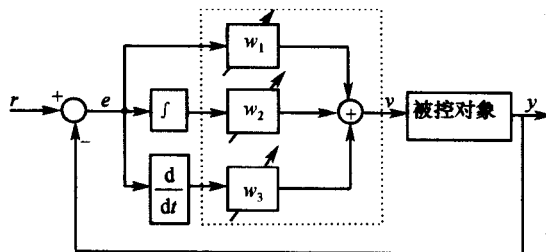


图 1.3 神经网络和 PID 控制现有结合方式二

比较图 1.1 和图 1.3 可知,单神经元结构 PID 控制器的形式与传统 PID 控制器的形式是相同的,所不同的是传统 PID 控制器的比例、积分、微分参数是预先设定的和固定不变的,而单神经元结构 PID 控制器的比例、积分、微分参数对应网络的连接权重值,是可按某种算法改变的。

虽然单神经元结构 PID 控制器的结构简单、容易实现,也具备神经网络的一些优点,但它也有本质性的弱点。一方面,它仍然是一种选择 PID 控制器参数的方法。另一方面,这种网络类似于 F. Rosenblatt 于 20 世纪 60 年代初提出的单层感知器(Perception),用 Delta 算法来修正权重值。这种单层网络只具备线性分类能力,甚至不能进行简单的异或逻辑运算,更不具备任意函数逼近能力,这种控制器在复杂系统的控制中难以达到良好的性能。

以上所述的两种类型的神经网络和 PID 控制的结合方式还有一个共同的不足之处,就是它们尚没有应用于多输入—多输出的多变量系统控制,目前的研究结果都是在一些比较简单的单变量系统的控制应用方面。

1.4 PID 神经网络(PIDNN)的特点和结构形式

1.4.1 PIDNN 的特点

PID 神经网络(Proportional-Integral-Derivative Neural Network, PIDNN),是由本人提出的一种新的神经网络。PIDNN 不是神经网络和传统 PID 控制规律的简单组合,不是用神经网络选择和整定 PID 参数。PIDNN 的基础是分别定义了具有比例、积分、微分功能的神经元,从而将 PID 控制规律融合进神经网络之中。

PIDNN 是一种多层前向神经网络,它的形式与一般多层前向神经网络类似,但它与一般多层前向神经网络有所不同,主要不同之处在隐含层。一般多层前向神经网络中的全部神经元的输入—输出特性都是相同的和静态的,而 PIDNN 的隐含层是由比例元、积分元和微分元组成的,这些神经元的输入—输出函数分别为比例、积分和微分函数,既有静态的,又有动态的。PIDNN 的各层神经元个数、连接方式、连接权重初值是按 PID 控制规律的基本原则确定的。PIDNN 采用误差反向传播算法修改连接权重值,通过在线训练和学习,使系统目标函数达到最优值。PIDNN 的详细结构和具体计算方法将在本书后续章节逐步介绍。

PIDNN 不是 PID 控制和神经网络的简单组合,它是将 PID 控制规律融合进神经网络之中,因此它具有神经网络和 PID 控制的优点,克服了传统控制方法和一般神经网络的缺点,它的主要特点如下:

(1) PIDNN 属于多层前向神经网络的范畴,因此它具备多层前向神经网络的任意函数逼近能力和其他优良的性能。

(2) PIDNN 参照 PID 控制规律的要求构成,它的结构比较简单和规范。它的结构由网络的输出量个数决定,而网络输出量个数和被控制的变量个数相等。

(3) PIDNN 的连接权重初值按 PID 控制规律的基本原则确定,在此初值的基础上进行网络的训练、学习和调整,使网络的收敛速度很快且不易陷入局部极小点。更重要的

是,可以利用现有 PID 控制的大量经验数据确定网络权重初值,从而使控制系统保持初始稳定,使系统的全局稳定成为可能。

(4) PIDNN 中包含了具有微分和积分动态特性的处理单元,因此它是一种本质性动态网络,容易适应控制系统的要求,在构成控制系统时不必再附加其他部件,它的输入信号无需经过网络外部的微分和积分处理。

(5) 比例元、积分元和微分元的存在,使 PIDNN 控制系统的响应快、超调小、无静差。

(6) PIDNN 采用无“教师”的自学习方式,根据控制效果进行在线自学习和调整,使系统具备较好的性能。

(7) PIDNN 可以适用于多种类型的单变量系统和多变量系统的控制,无需测量或辨识被控对象的内部结构和参数。

1.4.2 PIDNN 的结构形式

PIDNN 的结构形式随着网络输出量的个数的增减而变化,可分为单输出的 PIDNN(Single-output PIDNN, SPIDNN),和多输出的 PIDNN(Multi-output PIDNN, MPIDNN)。SPIDNN 用于单变量系统的控制,MPIDNN 用于多变量系统的控制。

SPIDNN 是 PIDNN 的基本形式,它是一个三层前向神经网络,为 $2 \times 3 \times 1$ 结构,它的输入层有两个神经元,接收外部输入信息;它的隐层有三个神经元,分别为比例元、积分元和微分元,完成比例、积分和微分运算;它的输出层只有一个神经元,完成控制规律的综合和输出。SPIDNN 的结构形式如图 1.4 所示,采用 SPIDNN 控制器的单变量控制系统的结构形式如图 1.5 所示。

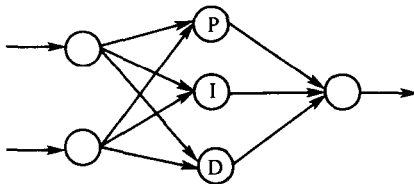


图 1.4 SPIDNN 结构形式

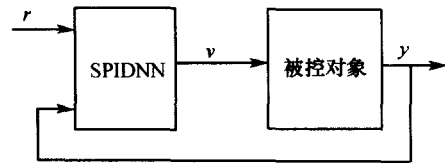


图 1.5 SPIDNN 单变量控制系统结构形式

MPIDNN 是 SPIDNN 的扩充和发展形式,MPIDNN 仍然是三层前向网络,它是由多个 SPIDNN 子网交叉并联而成的,如果被控对象为 m 个输入、 n 个输出,该 MPIDNN 就需要 n 个 SPIDNN 交叉并联,需要有 m 个输出,构成 $2n \times 3n \times m$ 结构的网络,即输入层有 $2n$ 个输入单元,隐含层有 $3n$ 个处理单元(其中包括 n 个比例元, n 个积分元, n 个微分元),输出层有 m 个输出单元。MPIDNN 的输入层至隐含层是按子网独立的,而其隐含层至输出层的连接权则是互相交叉连接的,使整个多输出 PIDNN 结合为一体。MPIDNN 的结构形式如图 1.6 所示。当 MPIDNN 作为控制器应用在多变量控制系统中时,其输入层的每个子网的两个输入单元分别输入一个被控变量的给定值和实际值,其输出层的 m 个单元的输出和被控多变量对象的 m 个输入相连。MPIDNN 多变量控制系统结构形式如图 1.7 所示。

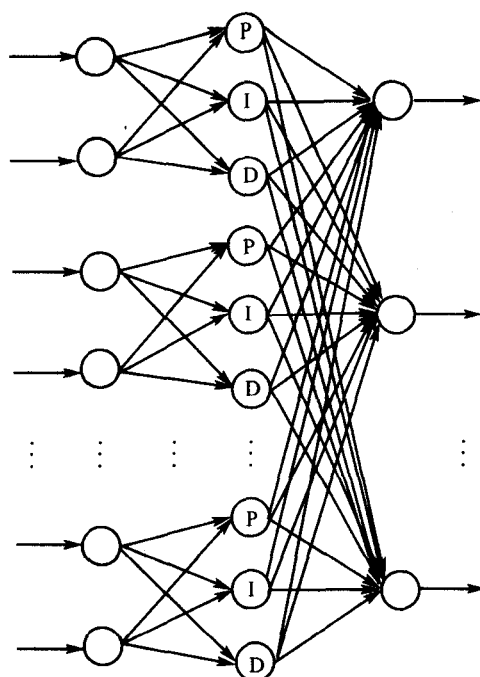


图 1.6 MPIDNN 结构形式

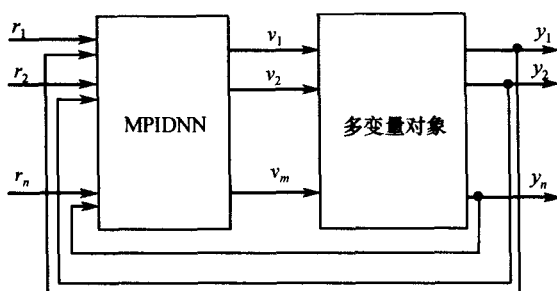


图 1.7 MPIDNN 多变量控制系统结构形式

1.5 对 PIDNN 所做的主要工作和创新点

作者在检索和分析了国内外有关文献的基础上，深入研究了多层神经网络和 PID 控制的特点，将 PID 控制规律融入多层神经网络，建立了一种新的神经网络，即 PIDNN。作者对 PIDNN 的理论基础、结构形式、实际性能和用途进行了研究，并重点研究了其构成的各类 PIDNN 控制系统。对此所进行的主要工作包括：

(1) 提出了比例元、微分元、积分元的概念，确定了它们的形式和特性，为 PIDNN 奠定了基础。

(2) 提出了新的神经网络 PIDNN 的基本概念，确定了这种具有内在动态特性的多层前向神经网络的结构形式，借鉴 PID 控制的特点，确定了连接权重初值。

(2) 建立了 PIDNN 的单输出形式(SPIDNN), 给出了 SPIDNN 的前向算法和反传学习算法。

(3) 建立了 PIDNN 的多输出形式(MPIDNN), 给出了 MPIDNN 的前向算法和反传算法。

(4) 分析和证明了 SPIDNN 的非线性逼近能力和 SPIDNN 单变量控制系统的稳定性条件。

(5) 分析和证明了 MPIDNN 的非线性逼近能力和 MPIDNN 多变量控制系统的稳定性条件以及 MPIDNN 在强耦合多变量系统中的解耦控制机理。

(6) 设计了基于 PIDNN 的系统辨识程序包。利用该程序包进行了多种线性系统、非线性系统、时变系统、单变量系统、多变量系统的辨识工作, 验证了 PIDNN 的函数逼近能力。

(7) 设计了一个采用 PIDNN 控制器的控制系统仿真程序包, 利用该程序包进行了单变量的线性一阶和二阶系统、带时延系统、非线性系统、时变系统的实时控制仿真, 证明了 SPIDNN 的自学习和自适应能力。进行了强耦合的二变量系统、三变量系统、带时延多变量系统、非线性多变量系统、时变多变量系统的实时控制仿真, 证明了 MPIDNN 的自适应解耦控制能力。

(8) 对 PIDNN 在不同计算机软件平台上的应用提出了指导意见, 总结了 PIDNN 应用研究的成果。