

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



GONGCHENG JIXIE
ZHINENGHUA JISHU

工程机械 智能化技术

吕广明 编 著



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



TU6-39
L891.1

TU6-39
L891.1

GONGCHENG JIXIE
ZHINENGHUA JISHU

工程机械 智能化技术

编 著 吕广明
主 审 陆念力



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

全书共分为六章，主要内容包括智能化的基本概念、工程机械中的常用智能化方法、工程起重机的智能化控制技术、液压挖掘机的智能化控制技术、摊铺机调平系统的智能控制技术、AGV的智能化控制技术等。

本书可作为高等工科学校机械类及近机类专业本科生和硕士研究生工程机械自动化及智能化技术课程主要教材，也可作为从事机电液一体化研究的广大工程技术人员参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程机械智能化技术/吕广明等编著. —北京: 中国电力出版社, 2007

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-5428-6

I. 工... II. 吕... III. 工程机械—智能控制—高等学校—教材 IV. TU6-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 050256 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 5 月第一版 2007 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.5 印张 326 千字

印数 0001—3000 册 定价 21.60 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

随着科学技术的日益发展,学科之间的相互交叉和融合,已成为当今技术发展的主流。工程技术人员单一的专业知识已不能适应新技术发展的要求,掌握完整的系统化设计理论和新的方法已成为必然。

本书是根据高等工科大学机械类及近机类专业工程机电液一体化课程的基本要求,以及从事机电液技术研究的广大工程技术人员的需要,结合编者多年的科研实践和教学经验编著而成的。全书从整体设计出发,将典型工程机械的工作原理、液压技术与智能控制技术有机结合,系统地讲述了设计过程所需的基本理论和基本方法,增加了适应科技发展的新知识、新技术、新理论,并通过典型工程机电液一体化设计实例,从系统理论分析及数学建模开始,讲述控制方法的选择、系统的特性分析及动态设计,最后结合计算机仿真技术实现系统的设计指标要求。从系统角度看,工程机电液系统属于非线性系统,详细地介绍了神经网络智能化控制技术在工程机械方面的研究成果。本书既有对工程机电液技术教学内容的精选,又有编者多年科研实践工作的总结。

全书共分为两大部分:第一部分介绍智能控制的基本概念,智能控制的研究对象及工程机械中的常用智能化方法;第二部分介绍典型工程机械中的起重运输机械、土方机械、路面施工机械及物流运输设备的智能化控制技术。在编写时,充分考虑了先修课程不同的各专业学生学习的特点及工程技术人员的需要,除阐述某些基本理论和必要的计算外,删去了一些繁琐的公式推导和不必要的内容,力求少而精。本书可适合不同专业、不同学时要求,采用可随意增减的模块化结构,根据不同专业、不同学科的要求可自行整节。为配合教学使用,本书还配有《工程机械自动化技术》及《工程机械智能化控制技术》课程的PPT讲稿。

全书由哈尔滨工业大学陆念力教授主审,哈尔滨工业大学白桦老师参加了第三章第二节部分的编写工作,薛渊老师参加了第五章的部分编写工作,姜鹏鹏、史海红、李馨、万众、孙薇、赵志学等同学为本书提供了部分实验数据及仿真结果,在此深表感谢。

由于编者水平有限,难免有错漏或不当之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2007年3月

目 录

前言	
第一章 绪论	1
第二章 工程机械中的智能化方法	7
第一节 多层 BP 网络	7
第二节 RBF 网络	14
第三节 Hopfield 网络	16
第四节 CMAC 神经网络	19
第五节 神经网络 PID 控制	23
第三章 工程起重机的智能化控制技术	26
第一节 塔式起重机国内外研究现状	26
第二节 塔式起重机动力学分析及模型	30
第三节 塔机工作机构系统仿真	38
第四节 起重机变频调速技术	51
第五节 变频调速系统设计与实验	68
第六节 大型起重机安全及健康监测技术	78
第七节 塔式起重机的位姿检测	84
第四章 液压挖掘机的智能化控制技术	100
第一节 液压挖掘机机器人化的意义	100
第二节 液压挖掘机工装位姿的数学建模	103
第三节 液压挖掘机控制系统建模	106
第四节 数字 PID 控制	114
第五节 神经网络控制	122
第六节 机构仿真及实验研究	132
第五章 摊铺机调平系统的智能化控制技术	139
第一节 摊铺机调平系统研究及应用现状	139
第二节 沥青混凝土摊铺机调平系统简介	142
第三节 沥青混凝土摊铺机的总体设计计算	151
第四节 沥青混凝土摊铺机的调平电液控制系统	154
第五节 控制系统常规控制方式的仿真	159
第六节 摊铺机的神经网络控制技术研究	169
第六章 AGV 的智能化控制技术	185
第一节 AGV 及其应用	185

第二节	AGV 的数学建模及运动分析	188
第三节	AGV 控制系统的特性分析	190
第四节	AGV 神经网络控制模型的建立	193
第五节	AGV 的路径仿真	200
参考文献		207
1	.....	第一章
2	.....	第二章
3	.....	第三章
4	.....	第四章
5	.....	第五章
6	.....	第六章
7	.....	第七章
8	.....	第八章
9	.....	第九章
10	.....	第十章
11	.....	第十一章
12	.....	第十二章
13	.....	第十三章
14	.....	第十四章
15	.....	第十五章
16	.....	第十六章
17	.....	第十七章
18	.....	第十八章
19	.....	第十九章
20	.....	第二十章
21	.....	第二十一章
22	.....	第二十二章
23	.....	第二十三章
24	.....	第二十四章
25	.....	第二十五章
26	.....	第二十六章
27	.....	第二十七章
28	.....	第二十八章
29	.....	第二十九章
30	.....	第三十章
31	.....	第三十一章
32	.....	第三十二章
33	.....	第三十三章
34	.....	第三十四章
35	.....	第三十五章
36	.....	第三十六章
37	.....	第三十七章
38	.....	第三十八章
39	.....	第三十九章
40	.....	第四十章
41	.....	第四十一章
42	.....	第四十二章
43	.....	第四十三章
44	.....	第四十四章
45	.....	第四十五章
46	.....	第四十六章
47	.....	第四十七章
48	.....	第四十八章
49	.....	第四十九章
50	.....	第五十章
51	.....	第五十一章
52	.....	第五十二章
53	.....	第五十三章
54	.....	第五十四章
55	.....	第五十五章
56	.....	第五十六章
57	.....	第五十七章
58	.....	第五十八章
59	.....	第五十九章
60	.....	第六十章
61	.....	第六十一章
62	.....	第六十二章
63	.....	第六十三章
64	.....	第六十四章
65	.....	第六十五章
66	.....	第六十六章
67	.....	第六十七章
68	.....	第六十八章
69	.....	第六十九章
70	.....	第七十章
71	.....	第七十一章
72	.....	第七十二章
73	.....	第七十三章
74	.....	第七十四章
75	.....	第七十五章
76	.....	第七十六章
77	.....	第七十七章
78	.....	第七十八章
79	.....	第七十九章
80	.....	第八十章
81	.....	第八十一章
82	.....	第八十二章
83	.....	第八十三章
84	.....	第八十四章
85	.....	第八十五章
86	.....	第八十六章
87	.....	第八十七章
88	.....	第八十八章
89	.....	第八十九章
90	.....	第九十章
91	.....	第九十一章
92	.....	第九十二章
93	.....	第九十三章
94	.....	第九十四章
95	.....	第九十五章
96	.....	第九十六章
97	.....	第九十七章
98	.....	第九十八章
99	.....	第九十九章
100	.....	第一百章

第一章 绪 论

智能控制是一门新兴的前沿交叉学科,广泛地应用于智能机器人控制、智能过程控制、智能专家系统、智能故障诊断、智能化仪器等诸多领域,在工程机械领域的应用还刚刚起步,具有广阔的应用前景。

由于液压与液力传动技术在工程机械技术构成中所占的比重越来越大,为突出这一特点,人们又将工程机械机电一体化称之为工程机械机电液一体化。在这一领域内,紧紧围绕着两个方面的内容进行研究:一是以简化驾驶员操作,提高设备的动力性、经济性以及作业效率,节省能源等为目的机械、电子、液压融合技术,如自动换挡系统、挖掘机恒功率输出控制系统等;二是以提高作业自动化程度为目的的机电一体化控制技术,如摊铺机、平地机自动找平和恒速控制系统、挖掘机工作装置运动轨迹的自动控制系统。纵观工程机械的发展历史,在技术上大致可以分为三个时期。

第一次是柴油机的出现,使工程机械有了较理想的动力装置,各类建筑机械的出现,形成以这一时期为特点的第一代产品。

第二次是液压技术的广泛应用,使工程机械的传动装置、工作装置更趋合理,为工程机械提供了良好的传动装置。液压传动结构紧凑,布置简单方便,易实现各种运动形式的转换,能满足复杂的作业要求,具有传动平稳性、过载性、可控性的特点,易实现无级变速,操纵简单轻便,形成了以全面液压化为标志的第二代产品。

第三次是电力电子化技术在工程机械方面的广泛应用,尤其是计算机技术的广泛应用,使工程机械向着高性能、自动化和智能化方向发展。为了减轻驾驶员的劳动强度和改善操纵性能,就要实现工程机械自动化;为了完成高技能的作业,就需要智能化;为了提高安全性,需要安全控制,进行运行状态监视,故障自动报警;为了避免人员无法接近场所和十分恶劣的作业环境,需要采用远距离操纵和无人驾驶技术,如摊铺机自动找平控制、挖掘机节能控制、全功率控制、轨迹控制、自动掘削控制等。性能向高精度、高效率、高性能、智能化的方向发展,功能向小型化、轻型化、多功能方向发展。

目前,国内外工程机械领域智能化的研究方兴未艾,具有很大的发展前景。希望今后可以加快其工程应用研究,开拓出一条工程机械自动化和智能化的研究途径。

一、智能控制的基本概念

智能控制已经出现了相当长的一段时间,并且取得一定的应用成果,但究竟什么是“智能”,什么是“智能控制”尚无统一明确的定义。虽然有些研究者也曾经给出定义,但是各种定义都是研究者在原来的研究领域进行探讨的结果,因此各有侧重。本节首先展开对智能控制含义的探讨,然后,阐述智能控制的特点,进一步加深对智能控制的理解。从工程控制角度来介绍智能控制及其系统的基本概念、基本结构、基本功能、特征模型、类型和发展概况等。

1. 什么是智能控制

关于什么是“智能”,通常认为是人所表现的行为。尽管其他某些生物也具有某种智能

行为,但不属于通常意义上的智能。从信息的角度来看,所谓智能,可具体地定义为:能有效地获取、传递、处理、再生和利用信息,从而在任意给定的环境下成功地达到预定目的的能力。可以看出,智能的特性是一种思维的活动,研究智能理论与技术的目的,是要设计制造出具有高度智能水平的人工智能系统,以便在某些必要的场合能够用人工系统替代人去执行各种任务。

就智能问题人们也取得了一些共识,认为人具有感知环境能力、记忆联想能力、思维能力和推理能力。知识越丰富,智能就越强;智能越强,获取和利用知识的能力越强,知识就越丰富。二者在人类实践活动中是相互促进的。因此,可以把人的智能行为归纳为认识世界和改造世界两个方面,但是更强调改造世界,认识世界是手段,改造世界才是目的。正如 W. R. Ashby 指出的,智能是“选择的恰当”,并将“追求目的”作为智能的过程。

智能控制概念中的智能,被认为是机器的行为,并不等价于人的智能。虽然在某些大型复杂的智能控制系统中会有人一机协作功能,甚至人直接参与决策过程,但强调的是用机器实现人的脑力劳动自动化,或者说强调的是机器高度自主实现追求目标的能力,而尽量减少人的干预。另外,这里强调的是机器仿人的智能,而对于如何模仿却没有界定。

智能控制实际只是对自动控制理论与技术发展到一个新阶段的概括。智能控制就是在常规控制理论基础上,吸收人工智能、运筹学、计算机科学、模糊数学、实验心理学、生理学等其他科学中的新思想、新方法,对更广阔的对象(过程)实现期望控制。其核心是如何设计和开发能够模拟人类智能的机器,使控制系统达到更高的目标。因此,智能控制并不排斥传统控制理论,而是继承和发扬它。首先,表现在控制论里的反馈和信息这两个基本概念,在智能控制理论中仍然占有重要地位,并且更加突出了信息处理的重要性。其次,在智能控制系统中并不排斥传统的控制理论的应用,恰恰相反,在分级递阶结构的智能控制系统中,执行级更强调采用传统控制理论进行设计,因为这一级的被控对象通常具有精确的数学模型,成熟的传统控制理论可以对其实现高精度的控制,而智能方法在传统控制理论显得乏力的场合使用更为恰当。当然,执行级也不排除智能方法的运用,特别是对对象数学模型不确定或有时变参数的场合,智能方法也可以显示其一定的优越性。

按照 K. S. Fu 和 Saridis 提出的观点,把智能控制看作是人工智能、自动控制和运筹学三个主要学科相结合的产物。图 1-1 所示的结构,被称之为智能控制的三元结构。

智能控制的三元结构可用交集形式表示如下:

$$IC = AI \cap AC \cap OR \quad (1-1)$$

式中:IC 为智能控制(Intelligent Control);AI 为人工智能(Artificial Intelligence);AC 为自动控制(Automatic Control);OR 为运筹学(Operations Research)。

人工智能(AI)是一个知识处理系统,具有记忆、学习、信息处理、形式语言、启发式推理等功能。自动控制(AC)描述系统的动力学特性,是一种动态反馈。运筹学(OR)是一种定量优化的方法,如线性规划、网络规划、调度、管理、优化决策和多目标优化方法等。这种三元结构理论表明,智能控制就是应用人工智能的理论与技术和运筹学的优化方法,并将其同控制理论方

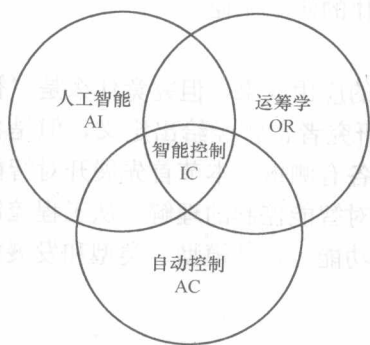


图 1-1 智能控制的三元结构

法与技术相结合,在未知环境下,仿效人的智能,实现对系统的控制。或者说,智能控制是一类无需(或很少的)人的干预就能够独立地驱动智能机器实现其目标的自动控制。可见,智能控制代表着自动控制科学发展的最新进程,智能控制是以知识为基础的系统,所以知识工程是研究智能控制的重要基础。

智能控制的定义可以有多种不同的描述,但从工程控制的角度来看,它的三个基本要素是:智能信息—智能反馈—智能决策。从集合的观点,可以把智能控制和它的三要素关系表示如下:

$$[\text{智能信息}] \cap [\text{智能反馈}] \cap [\text{智能决策}] \in \text{智能控制}$$

2. 智能控制的研究对象

智能控制是自动控制的最新发展阶段,主要用来解决那些用传统方法难以解决的复杂控制问题。传统控制包括经典反馈控制和现代理论控制,它们的主要特征是基于精确数学模型的控制。在传统控制的实际应用中遇到不少难题,主要表现在以下几点:①实际系统由于存在复杂性、非线性、时变性、不确定性和不完全性等,一般无法获得精确的数学模型;②研究这些系统时,必须提出并遵循一些比较苛刻的线性化假设,而这些假设在应用中往往与实际有误差;③对于某些复杂的和包含不确定性的控制过程,根本无法用传统数学模型来表示,即无法解决建模问题;④为了提高控制性能,传统控制系统可能变得很复杂,从而增加了设备的投资,降低了系统的可靠性。

在复杂对象的控制问题面前,将人工智能的方法引入控制系统,实现了控制系统的智能化,即采用仿人智能控制决策,迫使控制系统朝着期望的目标接近。

传统的控制方式是基于被控制对象精确模型的控制方式,实际上往往是利用不精确的模型,又采用固定的控制算法,使整个控制系统置于模型框架下,缺乏灵活性和应变能力,因而很难胜任对复杂系统的控制。而智能控制是把控制理论的方法和人工智能的灵活框架结合起来,改变控制策略去适应对象的复杂性和不确定性。可见传统控制和智能控制两种控制方式的基本出发点不同,导致了不同的控制效果。传统的控制适于解决线性、时不变等相对简单的控制问题。智能控制是控制理论发展的高级阶段,它主要用来解决传统方法难以解决的复杂系统的控制问题。其中包括智能机器人系统、计算机集成制造系统(CIMS)、复杂的工业过程控制系统、航天航空控制系统、社会经济管理系统、交通运输系统、环保及能源系统等。

具体地说,智能控制的研究对象具备以下一些特点。

(1) 系统模型不确定。传统的控制是基于模型的控制,这里的模型包括控制对象和干扰模型。对于传统控制,通常认为模型已知或者经过辨识可以得到,而智能控制的对象通常存在严重的不确定性。这里所说的模型不确定性包含两层意思:一是模型未知或知之甚少;二是模型的结构和参数可能在很大范围内变化。无论哪种情况,传统的方法都难于对它们进行控制。

(2) 系统具有高度非线性。在传统的控制理论中,线性系统理论比较成熟。对于具有高度非线性的控制对象,虽然也有一些非线性控制方法,但非线性控制理论还很不成熟,而且方法比较复杂。采用智能控制的方法可以较好地解决非线性系统的控制问题。

(3) 系统任务的复杂性。在传统的控制系统中,控制的任务或者是要求输出量为定值,或者是要求输出量跟随期望的运动轨迹,控制任务的要求比较单一。对于智能控制系统,任

务的要求往往比较复杂。例如,在智能机器人系统中,它要求系统对一个复杂的任务具有自行规划和决策的能力,有自动躲避障碍运动到期望目标位置的能力。再如,在复杂的工业过程控制系统中,除了要求对各被控物理量实现定值调节外,还要求能实现整个系统的自动启停、故障的自动诊断以及紧急情况的自动处理等功能。

智能控制是针对系统的复杂性、非线性、不确定性而提出来的。目前智能控制设计的途径有:基于专家系统的专家智能控制;基于模糊推理和计算的模糊控制器;基于人工神经网络的神经网络控制器;基于信息论、遗传算法和以上三种方法的集成型智能控制。

3. 智能控制系统的结构和特征

(1) 智能控制系统的一般结构。智能控制系统是实现某种控制任务的一种智能系统,是一种多层次结构的系统。感知信息处理部分将传感器递送的分级的和不完全的信息加以处理,并要在学习过程中不断加以辨识、整理和更新,以获得有用的信息。认知部分主要接受和存储知识、经验和数据,并对它们进行分析推理,作出行动的决策并送至规划和控制部分。规划和控制部分是整个系统的核心,它根据给定的任务要求、反馈信息及经验知识,进行自动搜索、推理决策、动作规划,最终产生具体的控制作用,规划控制器和执行机构作用于控制对象。对于不同用途的智能控制系统,以上各部分的形式和功能可能存在较大的差异。

(2) 智能控制系统的主要特征。智能控制的概念主要是针对被控系统的高度复杂性、高度不确定性及人们要求越来越高的控制性能提出来的。一个理想的智能控制系统应具备如下特征:①学习能力,系统对一个未知环境提供的信息进行识别、记忆、学习,并利用积累的经验进一步改善自身性能的能力,即在经历某种变化后,变化后的系统性能应优于变化前的系统性能,这种功能类似于人的学习过程;②适应性,系统应具有适应受控对象动力学特征变化、环境变化和运行条件变化的能力,这种智能行为实际上是一种从输入到输出之间的映射关系,可看成是不依赖模型的自适应估计,较传统的自适应控制中的适应功能具有更广泛的意义;③容错性,系统对各类故障应具有自诊断、屏蔽和自恢复的功能;④鲁棒性,系统应对环境干扰和不确定性因素不敏感;⑤组织功能,对于复杂任务和分散的传感信息具有自组织和协调功能,使系统具有主动性和灵活性,即智能控制器可以在任务要求的范围内自行决策,主动采取行动,当出现多目标冲突时,在一定限制下,各控制器可在一定范围内自行解决,使系统能满足多目标,高标准的要求;⑥实时性,系统应具有相当的在线实时响应能力;⑦人一机协作,系统应具有友好的人—机界面,以保证人一机通信、人一机互助和人—机协同工作。

4. 智能控制是自动控制理论发展的必然趋势

自动控制理论的基本思想早已存在,自动控制理论是人类在征服自然、改造自然的斗争中形成和发展的。例如,利用反馈原理调节流量的克泰西比斯水钟,以及19世纪中叶J.C·麦克斯威尔对具有调速器的蒸汽发动机系统的稳定性所做的工作,都标志着人们对控制理论探索的历程,20世纪20年代,布莱克、奈奎斯特和波德等人在贝尔实验室做的一系列工作奠定了经典控制理论的基础。尤其是第二次世界大战期间,新武器的研制和战后经济的恢复与发展,都极大地激发了人们对控制理论的研究热情,使古典控制理论日趋成熟,并取得许多应用成果。

控制理论从形成发展至今,已经历了60多年的历程,分为三个阶段。第一阶段是以20

世纪 40 年代兴起的调节原理为标志,成为经典控制理论阶段;第二阶段以 20 世纪 60 年代兴起的状态空间法为标志,称为现代控制理论阶段;第三阶段则是 20 世纪 80 年代兴起的智能控制理论阶段。

二、模糊逻辑及遗传算法

模糊逻辑系统是指与模糊概念(如模糊集合、模糊语言变量)和模糊逻辑有直接关系的系统。对于绝大多数的应用系统而言,其获取的重要信息有两种:即来自传感器的数据信息和来自提供系统性能描述的专家信息即语言信息。数据信息通常可用数字量表示,而语言信息则可用文字如“大”、“小”表示。由于模糊逻辑是一种精确解决不精确不完全信息的方法,可以比较自然地处理人类的概念,因此模糊逻辑系统可有效地利用语言信息,有着极其广泛而重要的应用。

遗传算法是一种建立在自然选择和群体遗传机理基础上的自适应概率性搜索算法,它根据“适者生存,优胜劣汰”等自然进化规则演化而来。与传统搜索算法不同,遗传算法把优化问题解的搜索空间映射为遗传空间,把每一可能的解编码称为一个染色体的二进制串(也有其他编码方法),染色体的每一位称为基因。每个染色体(对应一个个体)代表一个解,一定数量的个体组成群体。搜索时,首先随机地产生一些个体组成初始群体(即问题的一组候选解),初始种群产生之后,按照适者生存和优胜劣汰的原理,逐代演化产生出越来越好的近似解。在每一代,按预先根据目标函数确定的适应度函数计算个体对问题环境的适应度,再根据个体适应度对个体对应的染色体进行选择,抑制适应度低的染色体,弘扬适应度高的染色体,然后进行选择、交叉、变异等遗传操作,产生进化了的新一代群体。如此反复操作,一代一代不断向更优解方向进化,最后得到满足某种收敛条件的最适应问题环境的群体,从而获得问题的最优解。

三、神经网络方法

人工神经网络(简称神经网络)控制作为现代控制理论的延伸,为解决复杂的非线性、不确定、不确知系统的控制问题开辟了一条新的途径。

神经网络是一个并行、分布处理结构,它由处理单元及称为连接的无向信号通道互联而成。这些处理单元具有局部内存,并可以完成局部操作。每个处理单元有一个单一的输出联结,这个输出可以根据需要被分支成希望个数的许多并行联结,且这些并行联结都输出相同的信号,即相应处理单元的信号,信号的大小不因分支的多少而变化。处理单元的输出信号可以是任何需要的数学模型,每个处理单元中进行的操作必须是完全局部的。也就是说,它必须依赖经过输入联结到达处理单元的所有输入信号的当前值和存储在处理单元局部内存中的值。图 1-2 为前向神经网络的简单框图。

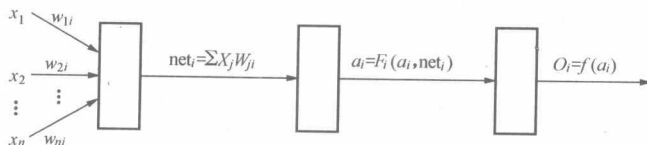


图 1-2 前向神经网络

神经网络最为突出的优点就是无需建立数学模型,只需知道输入空间和输出空间,就可以建立输入空间到输出空间的某种映射关系。而且,神经网络可以对输入空间进行划分,从

而降低了映射的误差,使得相近的输入有着相近的输出。对于控制对象为未知系统和难以建立数学模型的控制系统,选择人工神经网络作为其控制策略可以达到良好的控制效果。神经网络对控制领域有吸引力的特征还在其本质上是非线性系统,所以能逼近任意 L_2 上的非线性函数,可以多输入、多输出,能自适应进行学习,以适应环境的变化。

非线性动态系统中最常用到的神经网络为多层前向 BP 网络和径向基函数(RBF)网络,它们都是前向网络,此外,还有典型的反馈网络——Hopfield 网络。正是神经网络控制具有诸多的优点,其作为智能化的控制工具广泛应用于模式识别与图像处理、控制及优化、金融预测与管理等众多领域。

神经网络控制具有诸多的优点,其作为智能化的控制工具广泛应用于模式识别与图像处理、控制及优化、金融预测与管理等众多领域。

神经网络控制具有诸多的优点,其作为智能化的控制工具广泛应用于模式识别与图像处理、控制及优化、金融预测与管理等众多领域。

神经网络控制具有诸多的优点,其作为智能化的控制工具广泛应用于模式识别与图像处理、控制及优化、金融预测与管理等众多领域。



图 1-1-1 神经网络结构示意图

神经网络控制具有诸多的优点,其作为智能化的控制工具广泛应用于模式识别与图像处理、控制及优化、金融预测与管理等众多领域。

第二章 工程机械中的智能化方法

第一节 多层 BP 网络

目前,在人工神经网络的实际应用中,绝大部分的神经网络模型是采用误差反向传播(BP)网络及其变化形式,它也是前向网络的核心部分,体现了人工神经网络最精华的部分。BP学习算法由正向传播和反向传播组成。正向传播是输入信号从输入层经隐层传向输出层,若输出层得到了期望的输出,则学习算法结束;否则,转至反向传播。反向传播就是将误差信号(样本输出与网络输出之差)按原联结通路反向计算,由梯度下降法调整各层神经元的权值和阈值,使网络产生的输出更接近于期望的输出,直到满足确定的允许误差。BP网络的优缺点:①网络结构简单,易于硬件实现;②具有广泛的适用性,BP网络是目前在工程实践中应用广泛的神经网络;③存在局部极小值问题,原因是BP算法采用梯度下降法,对于复杂网络,其误差为多维空间曲面,成碗状,碗底是最小值,但碗的表面凹凸不平,因而在训练过程中,可能陷入某一小谷区,即局部极小值;④网络训练速度慢,主要是由于学习速率太小而造成,学习速率过大则可能导致网络不能收敛。

多层BP的网络结构如图2-1所示。网络的输入、输出信号,每一神经元用一个结点表示,网络由输入层、隐层和输出层结点组成,隐层可一层也可多层,层间结点通过权联结。由于采用BP学习算法,所以称之为BP神经网络。

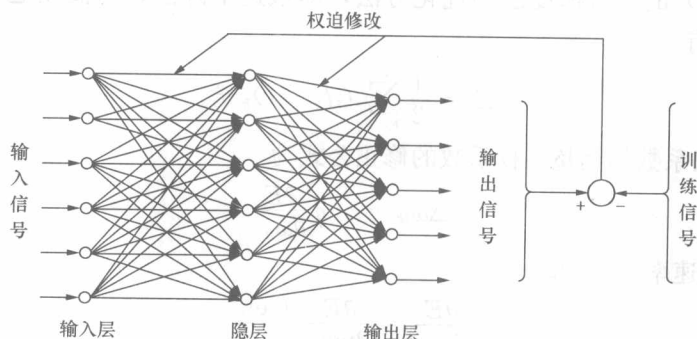


图 2-1 BP 网络结构

一、BP 网络理论

在训练该网络的学习阶段,设有 N 个样本,现假定用其中的某一固定样本中的输入输出模式 X_p 和 $\{d_{pk}\}$ 对网络进行训练。隐层的第 j 个结点的输入写为

$$\text{net}_{pj} = \text{net}_j = \sum_{i=1}^M \omega_{ij} O_i$$

第 j 个结点的输出为

$$O_j = f(\text{net}_j) \quad (2-1)$$

其中,

$$f(\text{net}_j) = \frac{1}{1 + e^{-(\text{net}_j - \theta_j)}} \quad (2-2)$$

式中 $f(\text{net}_j)$ —— 激发函数;

θ ——阈值。

第 j 个结点的输出 O_j 将通过加权系数 ω_{jk} 向前传播到第 k 个结点, 输出层第 k 个结点的总输入为

$$\text{net}_k = \sum_{j=1}^q \omega_{jk} O_j$$

式中 q ——隐层的结点数。

输出层第 k 个结点的实际网络输出为

$$O_k = f(\text{net}_k) \quad (2-3)$$

若网络输出与期望输出值 d_k 不一致, 则将其误差信号从输出端反向传播, 并在传播过程中对加权系数不断修正, 使在输出层结点上得到的输出结果尽可能接近期望输出值 d_k 。对样本 p ($p = 1, 2, \dots, P$) 完成网络加权系数的调整后, 再送入另一样本模式对, 进行类似学习, 直到完成 P 个样本的训练学习为止。

1. BP 网络权值的调整规则

设每一样本 p 的输入输出模式对的二次型误差函数定义为

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^L (d_{pk} - O_{pk})^2 \quad (2-4)$$

系统的平均误差代价函数为

$$E = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^L (d_{pk} - O_{pk})^2 = \sum_{p=1}^P E_p$$

式中: P 为样本模式对数; L 为网络输出结点数。

基于式 (2-4) 的一阶梯度法的优化方法, 即最速下降法, 为简便起见, 略去下标 p , 重写式 (2-4), 有

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^L (d_k - O_k)^2 \quad (2-5)$$

(1) 输出层权系数的调整。权系数的修正公式为

$$\Delta \omega_{jk} = -\eta \frac{\partial E}{\partial \omega_{jk}} \quad (2-6)$$

式中 η ——学习速率, $\eta > 0$ 。

$$\frac{\partial E}{\partial \omega_{jk}} = \frac{\partial E}{\partial \text{net}_k} \frac{\partial \text{net}_k}{\partial \omega_{jk}}$$

定义反传误差信号 δ_k 为

$$\delta_k = -\frac{\partial E}{\partial \text{net}_k} = \frac{\partial E}{\partial O_k} \frac{\partial O_k}{\partial \text{net}_k} \quad (2-7)$$

其中

$$\frac{\partial E}{\partial O_k} = -(d_k - O_k)$$

$$\frac{\partial O_k}{\partial \text{net}_k} = \frac{\partial}{\partial \text{net}_k} f(\text{net}_k)$$

$$\delta_k = (d_k - O_k) f'(\text{net}_k) = O_k (1 - O_k) (d_k - O_k) \quad (2-8)$$

又

$$\frac{\partial \text{net}_k}{\partial \omega_{jk}} = \frac{\partial}{\partial \omega_{jk}} \left(\sum_{j=1}^q \omega_{jk} O_j \right) = O_j$$

由此可得输出层的任意神经元权系数的修正公式为

$$\Delta\omega_{jk} = \eta(d_k - O_k)f'(\text{net}_k)O_j = \eta\delta_k O_j$$

或

$$\Delta\omega_{jk} = \eta O_k(1 - O_k)(d_k - O_k)O_j \quad (2-9)$$

(2) 隐层结点权系数的调整。计算权系数的变化量为

$$\begin{aligned}\Delta\omega_{ij} &= -\eta \frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial \text{net}_j} \frac{\partial \text{net}_j}{\partial \omega_{ij}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial \text{net}_j} O_i \\ &= \eta \left(-\frac{\partial E}{\partial O_j} \frac{\partial O_j}{\partial \text{net}_j} \right) O_i \\ &= \eta \left(-\frac{\partial E}{\partial O_j} \right) f'(\text{net}_j) O_i \\ &= \eta \delta_j O_i \quad (2-10)\end{aligned}$$

式中 $\left(\frac{\partial E}{\partial O_j}\right)$ 不能直接计算, 需通过其他间接量进行计算, 即

$$\begin{aligned}-\frac{\partial E}{\partial O_j} &= -\sum_{k=1}^L \frac{\partial E}{\partial \text{net}_k} \frac{\partial \text{net}_k}{\partial O_j} \\ &= \sum_{k=1}^L \left(-\frac{\partial E}{\partial \text{net}_k} \right) \frac{\partial}{\partial O_j} \left(\sum_{j=1}^q \omega_{jk} O_j \right) \\ &= \sum_{k=1}^L \left(-\frac{\partial E}{\partial \text{net}_k} \right) \omega_{jk} \\ &= \sum_{k=1}^L \delta_k \omega_{jk}\end{aligned}$$

显然有

$$\delta_j = f'(\text{net}_j) \sum_{k=1}^L \delta_k \omega_{jk} \quad (2-11)$$

将样本标记 p 计入公式后, 对于输出结点 k

$$\Delta_p \omega_{jk} = \eta f'(\text{net}_{pk})(d_{pk} - O_{pk})O_{pj} = \eta O_{pk}(d_{pk} - O_{pk})O_{pj} \quad (2-12)$$

对于隐含结点 j

$$\Delta_p \omega_{ij} = \eta f'(\text{net}_{pj}) \left(\sum_{k=1}^L \delta_{pk} \omega_{jk} \right) O_{pj} = \eta O_{pj}(1 - O_{pj}) \left(\sum_{k=1}^L \delta_{pk} \omega_{jk} \right) O_{pi} \quad (2-13)$$

式中 O_{pk} ——输出结点 k 的输出;

O_{pj} ——隐含结点 j 的输出;

O_{pi} ——输入结点 i 的输出。

2. BP 学习算法的计算步骤

BP 学习算法流程如下。

- (1) 初始化, 置所有权值为较小的随机数。
- (2) 提供训练集, 给定输入向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_M)$ 和期望的目标输出向量 $D = (d_0, d_1, \dots, d_L)$ 。

(3) 计算实际输出, 按式 (2-1)、式 (2-3) 计算隐层、输出层各神经元输出。

(4) 按式 (2-4) 计算目标值与实际输出的偏差 E_p 。

(5) 按式 (2-12) 计算 $\Delta_p \omega_{jk}$ 。

(6) 按式 (2-13) 计算 $\Delta_p \omega_{ij}$ 。

(7) 返回 (2) 重复计算, 直到误差 E_p 满足要求为止。

二、面向 MATLAB 的 BP 神经网络原理

在 BP 神经网络中经常使用对数 S 型函数、正切 S 型函数和线型函数作为神经元的传递函数。对数 S 型函数产生 0~1 之间的输出, 而正切 S 型函数产生 -1~1 之间的输出。所以在多层 BP 神经网络中, 采用不同的传递函数将得到不同范围的输出, 如果采用线性函数就可以得到任意大小的输出值。对 BP 神经网络来说, 传递函数的可微性尤其重要, 因为在 BP 网络的训练算法中要求传递函数必须可微。在 MATLAB 中, 上面三个函数, `tansig`、`logsig` 和 `purelin` 都有对应的微分函数 `dtansig`、`dlogsig` 和 `dpurelin`, 要得到与传递函数对应的微分函数, 只需要用 “deriv” 调用该函数就可以了。

在程序的设计中采用了 MATLAB 提供的神经网络工具箱中的图形用户界面。图形用户界面是一个独立的窗口——GUI Network/Data Manager 窗口。这个窗口和 MATLAB 的命令窗口相分离, 但是可以通过 GUI Network/Data Manager 窗口中的选项 `export` 将 GUI 的结果数据输出到命令窗口中, 通过 “import” 选项将命令窗口中的数据输入到 GUI Network/Data Manager 窗口中。一旦图形用户界面运行, 就可以创建一个神经网络, 而且可以查看它的结构, 对其进行仿真和训练, 当然还可以输入和输出数据。

1. BP 网络对非线性函数的逼近能力

将 BP 网络直接充当反馈控制系统中的控制器。如图 2-2 所示为一般反馈控制系统原理图。当 BP 网络充当控制器时, 其工作原理如下:

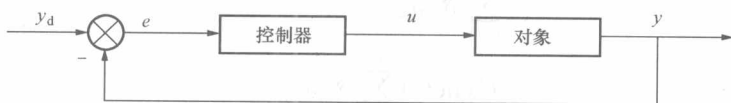


图 2-2 一般反馈控制系统原理图

设被控系统对象的输入 u 和系统输出 y 之间满足函数 $y = g(u)$ 。控制的目的是确定最佳的控制量输入 u , 使系统的实际输出 y 等于期望的输出 y_d 。在该系统中, 可把神经网络的功能看作输入输出的某种映射或称函数变换, 并设它的函数关系为 $u = f(y_d)$ 。为了满足系统的输出 y 等于期望的输出 y_d , 将前两式代入, 可得 $y = g[f(y_d)]$ 。显然 $f(\cdot) = g^{-1}(\cdot)$ 时, 满足 $y = y_d$ 的要求。

由于神经网络控制的被控对象一般是复杂的且多具有不确定性, 因此 $g(\cdot)$ 是难以建立的, 但通过系统的实际输出 y 与期望输出 y_d 之间的误差来调整神经网络中的联结权值, 即让神经网络学习, 直至误差 $e = y_d - y$ 趋于零的过程, 就是神经网络模拟 $g^{-1}(\cdot)$ 的过程, 它实际上是对被控对象的一个求逆过程。由神经网络的学习算法实现这一求逆过程, 就是神经网络实现直接控制的基本思想。为此, 要利用 BP 神经网络, 首先要讨论它对非线性函数的逼近能力。下面用加噪声的正弦信号来测试 BP 网络逼近非线性函数的能力, 并测试 BP 神经网络几种常用训练算法的优劣。

建立的网络采用三层网络 5 输入 5 输出, 隐层取 8 个结点。隐层采用非对称 S 型函数, 输出层采用对称 S 型函数, 如图 2-3 所示。

为了测试该网络性能, 第一个输入采取有噪声的正弦信号输入, 训练样本如图 2-4 所

示, 为标准正弦波上叠加一个噪声信号, 模拟实际应用时的情况, 用加噪声的正弦信号作为训练信号检测网络性能是可行的。

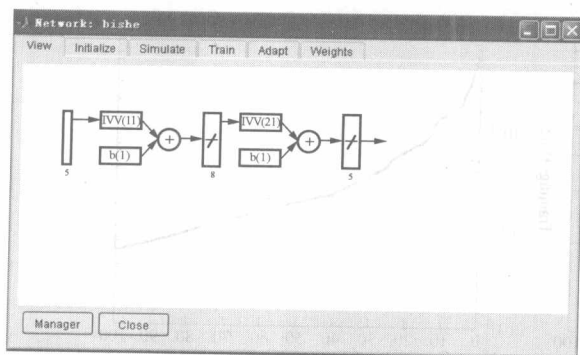


图 2-3 BP 神经网络结构

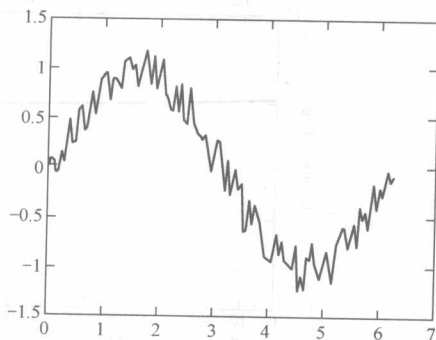


图 2-4 BP 网络训练样本

2. 批梯度下降训练函数 (traingd)

训练函数 `traingd` 有 7 个参数: `epochs`、`show`、`goal`、`time`、`min_grad`、`max_fail` 和 `lr`。`lr` 是网络的学习率, 它的值越大, 权值和阈值的调整幅度越大。但是如果学习率太大, 会使网络的稳定性大大降低。`show` 用于显示每次训练的状态, 如果它的值是 `NaN`, 训练状态将不会被显示。如果网络的训练次数大于 `epochs`, 网络的性能函数值小于 `goal` 或者训练时间超过了 `time` 秒, 网络的训练都将停止。而参数 `max_fail` 的值与初期终止技术有关。由图 2-5 (a) 可以看出采用 `traingd` 训练函数训练网络, 无论是误差还是收敛速度都不能满足要求。所以, 通常采用改进的训练算法。

3. 有弹回的 BP 算法 (trainrp)

多层 BP 神经网络, 常常使用 S 型传递函数。S 型函数的特点是可以把无限的输入映射到有限的输出, 而且当输入很大或者很小的时候, 函数的斜率接近于 0。这使得在训练具有 S 型神经元的多层 BP 网络时, 计算出的梯度会出现小的情况, 这使网络权值和阈值的改变量也很小, 从而影响了网络的训练速度。

有弹回的 BP 算法的目的就是为了解决这个问题, 以消除梯度模值对网络训练带来的影响。在该算法中, 梯度的符号决定了权值和阈值的变化方向, 而梯度的模值对权值和阈值的变化不起作用。这里是通过单独的参数来更新网络的权值和阈值。当网络性能函数对某权值的微分在连续的两个训练周期内具有相同的符号时, 该权值的改变量将通过参数 `delt_inc` 得到增加, 反之就通过 `delt_dec` 来减小。如果该导数为 0, 那么权值的改变量保持不变。

函数 `trainrp` 的参数包括 `epochs`、`show`、`goal`、`time`、`min_grad`、`max_fail`、`delt_inc`、`delt_dec`、`delt0`、`deltamax`。其中后两个参数是初始步幅和最大步幅, 训练结果如图 2-5 (b) 所示。

4. 比例共轭梯度算法 (trainscg)

前面讨论的共轭梯度算法需要在每个训练周期中线性地搜索网络的调整方向, 这种线性的搜索方式在每次搜索中都要多次对所有样本进行计算, 这样就消耗了大量的时间。而比例共轭算法就将模型信赖域算法与共轭梯度算法结合起来, 有效地减少了搜索时间。

函数 `trainscg` 的训练参数包括 `epochs`、`show`、`goal`、`time`、`min_grad`、`max_fail`、`sig`