



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

ZHINENG KONGZHI
XITONG JI YINGYONG

智能控制 系统及应用

张国忠 主编



中国电力出版社

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

自动控制理论（第四版）
 自动控制理论（第三版）
 自动控制原理
 自动控制原理—理论篇
 16/32位微机原理及接口技术
 可编程序控制器原理及应用
 接口与通信
 电气信息技术基础
 电磁测量技术
 电磁场导论
 电机学（第三版）
 电机学
 电机理论基础
 微特电机及系统
 电气工程概论
 电气工程概论
 电气工程概论
 电气工程CAD技术
 电力系统概论
 电力系统基础（第二版）
 电力工程
 发电厂电气部分
 发电厂及变电站的二次回路
 电力系统继电保护原理（第四版）
 微型机继电保护基础（第三版）
 电力网继电保护原理
 现代高压电网继电保护原理
 电力系统自动装置原理（第四版）
 电力系统自动化（第五版）
 电力系统自动化（第二版）
 电力系统故障分析（第三版）
 电力系统分析（第三版）
 电力系统规划
 高电压技术（第二版）
 高电压技术（第二版）
 电能计量技术
 电力建设工程造价控制与管理
 电能质量分析与控制
智能控制系统及应用
 MATLAB在电气工程中的应用
 交直流调速系统与MATLAB仿真
 过程参数检测及仪表
 电力技术经济原理
 电力企业管理
 电气工程及其自动化专业英语
 电力新技术概论

孙扬声
 文 锋
 于希宁
 杨 平
 朱有产
 郁汉琪
 王保义
 夏安邦
 李宝树
 孟昭敦
 牛维扬
 陈世元
 凌跃胜
 程 明
 熊信银
 李建华
 肖登明
 冯林桥
 杨淑英
 杨以涵
 尹克宁
 姚春球
 何永华
 贺家李
 杨奇逊
 孙国凯
 李晓明
 杨冠城
 李先彬
 王 葵
 刘万顺
 于永源
 程浩忠
 赵智大
 张一尘
 王月志
 黄宵宁
 肖湘宁
张国忠
 李维波
 周渊深
 常太华
 肖先勇
 卢建昌
 苏小林
 王仁祥

ISBN 978-7-5083-6731-6



9 787508 367316 >

定价：35.60元



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

ZHINENG KONGZHI
XITONG JI YINGYONG

智能控制 系统及应用

主编 张国忠

参编 孟红霞 邓其军 熊 勇 李金城

主审 王永骥 余厚全



中国电力出版社

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

Electrical Engineering



内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书共分八章，主要内容包
括：模糊控制、神经网络控制、混沌控制、遗传算法、专家控制系统、群集智能控
制、人工免疫系统及应用。本书比较系统地论述了智能控制的基本概念、原理、实
现方法、系统仿真及其应用；同时，注重理论与电力系统工程实际相结合，书中附
有大量 Matlab 仿真程序，使读者易于领会和掌握问题的实质，并能够较快地用以
解决实际问题。

本书可作为高等学校电气信息类专业本科和研究生教材，也可作为科技人员参
考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

智能控制系统及应用/张国忠主编. —北京：中国电力
出版社，2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5083-6731-6

I. 智… II. 张… III. 智能控制—控制系统—高等
学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 015462 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 12 月第一版 2007 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22.25 印张 549 千字

定价 35.60 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

智能控制是当今国内外自动化学科中一个十分活跃和具有挑战性的领域,又是一门新兴的交叉学科。它是人工智能、自动控制、运筹学、计算机科学、模糊数学、神经网络理论,进化论、模式识别、信息论、仿生学和认知心理学等多种学科相互结合与渗透,高度综合与集成的产物,有着极其广阔的应用背景。目前已用于各种工业自动化,冶金和化工过程控制,电力系统与核电安全运行,航空航天飞行器对接,智能机器人,智能通信网络,智能化仪器仪表,家电行业等领域。特别是由于信息技术与控制技术的飞速发展,促使控制系统向智能控制系统发展,自动化技术向智能自动化技术发展,已经成为一种必然的趋势。

本书比较系统地论述了智能控制的基本概念、原理、实现方法、系统仿真及其应用。本书第一章着重介绍了智能控制的基本内涵、结构、特点、分类、智能控制与传统控制的关系,智能控制系统的历史、现状与发展趋势;第二章介绍了模糊逻辑的基础知识,模糊控制系统的组成、基本原理、设计方法,最后,介绍了两个实际模糊控制系统;第三章介绍了神经网络的基本概念,几种常用典型的神经网络模型、学习算法及其应用,神经网络控制系统的分类、结构及其应用;第四章重点介绍了混沌控制的基本知识及其具有代表性的混沌控制方法,包括 OGY 方法及 OGY 改进方法,线性反馈、非线性反馈、时间延迟反馈等各种反馈控制方法以及混沌自适应控制方法及其在电力系统中的应用实例;第五章介绍了遗传算法的基本概念、原理,遗传算法应用中的基本问题,几种改进的遗传算法,遗传算法在控制系统设计中的应用;第六章介绍了专家系统的发展、定义、分类、组成结构、类型、设计原则、设计过程及应用实例;第七章介绍了群集智能的概念,粒子群优化算法的拓扑结构、邻域结构、改进策略及其在自动控制中的应用;第八章介绍了人工免疫算法和生物免疫系统的基本概念及其组成和功能、优化运行、可控性、可预测性及其几种典型应用。

本书注重理论与电力系统工程实际相结合,使读者易于领会和掌握问题的实质,并能够较快地用以解决实际问题,书中大多数较复杂的例子都附有 MATLAB 仿真程序。同时,在介绍理论的基础上,还融入了作者及其他研究者的实际应用成果,为智能控制理论在相应领域的应用提供了研究方法上的参考和借鉴。

本书由武汉大学张国忠教授任主编,编写了第一、三章;第二、四章由武汉大学孟红霞老师编写;第六章由武汉大学邓其军老师编写;第五、七章由武汉大学熊勇老师编写;第八章由郑州轻工业学院李金城老师参与编写。全书由张国忠教授统稿。华中科技大学博士生导师王永骥教授和长江大学博士生导师余厚全教授对本书作了认真的评审,并提出了许多宝贵的意见,在此深表谢意。

本书是教育部普通高等教育“十一五”国家级规划教材,在编写和出版过程中得到中国电力出版社、武汉大学的资助,在此一并表示感谢!

感谢本书“参考文献”中所列出的国内外著作、论文的作者,正是他们的出色工作,才

丰富了本书的内容。

由于智能控制是一门新兴学科，目前仍处于发展阶段，有些理论性问题还有待深入研究和发 展，同时限于编者水平和经验，书中不足或错误之处在所难免，敬请广大读者和专家们给予批评指正。

张国忠

2007年8月于珞珈山

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 智能控制的基本概念与研究内容	1
第二节 智能控制系统的性能与特点	4
第三节 智能控制系统的分类	5
第四节 智能控制的发展概况	11
小结	15
习题一	16
第二章 模糊控制	18
第一节 模糊控制理论的基本概念	18
第二节 基于模糊控制的智能控制系统	48
第三节 控制系统的应用实例	75
小结	84
习题二	85
第三章 神经网络控制	87
第一节 神经网络的基本概念	88
第二节 误差反传算法及其应用	94
第三节 径向基函数(RBF)神经网络及其应用	111
第四节 Hopfield 神经网络及其应用	115
第五节 模拟退火算法及其应用	130
第六节 自组织特征映射(SOFM)神经网络及其运用	140
第七节 人工神经网络智能控制系统概述	143
第八节 神经网络 PID 控制	148
第九节 神经网络预测控制	162
第十节 神经网络模型参考控制	168
小结	171
习题三	172
第四章 混沌控制	174
第一节 基本概念和理论基础	174
第二节 混沌控制的基本理论	181
第三节 混沌控制在电力系统中的应用	204
小结	211
习题四	212

第五章 遗传算法	213
第一节 遗传算法概述	213
第二节 遗传算法原理	220
第三节 遗传算法在自动控制中的应用	240
小结	243
习题五	243
第六章 专家控制系统	244
第一节 专家系统概述	244
第二节 专家控制系统概述	274
第三节 实时专家控制系统	292
小结	294
习题六	294
第七章 群集智能控制	295
第一节 粒子群优化算法的简介	295
第二节 粒子群优化算法的来源及背景	296
第三节 PSO 的拓扑结构和邻域结构	301
第四节 惯性权系数	303
第五节 粒子的行为分析	304
第六节 粒子群优化算法的缺陷及改进策略	306
第七节 混沌粒子群优化算法	307
第八节 嵌入梯度算法的混合粒子群优化方法	309
第九节 基于旋转曲面变换的粒子群优化算法	310
第十节 粒子群优化算法在自动控制中的应用	313
小结	319
习题七	319
第八章 人工免疫系统及应用	320
第一节 生物免疫系统	320
第二节 人工免疫系统	325
第三节 人工免疫算法	330
第四节 人工免疫系统应用	339
小结	344
习题八	344
参考文献	345

第一章 绪 论

智能控制是当今国内外自动化学科中一个十分活跃和具有挑战性的领域，又是一门新兴的交叉学科。它与人工智能、自动控制、运筹学、计算机科学、模糊数学、神经网络理论、进化论、模式识别、信息论、仿生学和认知心理学等有着密切的关系，是相关学科相互结合与渗透的产物，具有广阔的应用背景，并形成一门新的智能自动化学科。

目前，有关智能控制的定义、理论、结构等尚无统一的系统描述。本章主要介绍了智能控制的基本概念、研究内容和发展概况，智能控制系统的性能、特点及分类。

第一节 智能控制的基本概念与研究内容

一、智能控制的内涵

智能控制的概念主要是针对被控系统具有高度复杂性和高度不确定性以及人们要求越来越高的控制性能提出来的。正如其他前沿学科一样，智能控制理论至今尚无一个公认的统一定义。下面给出一些智能控制概念的提法。

从学科结构理论上说，先后已提出了智能控制是二元、三元和四元交集的论述。

1. 智能控制二元交集论

美籍华人科学家傅京孙 (K. S. Fu) 于 1971 年提出智能控制二元交集论。他把智能控制概括为自动控制与人工智能的交集。可用图 1-1 和式(1-1)表示。

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

式中， $\cap$ 表示交集，各子集的含义为

IC——智能控制 (Intelligent Control)；

AC——自动控制 (Automatic Control)；

AI——人工智能 (Artificial Intelligence)。

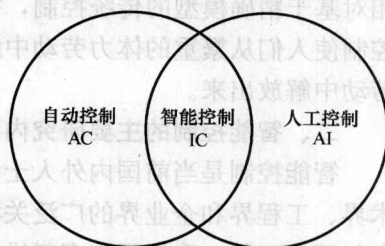


图 1-1 智能控制二元交集论结构

二元交集论主要强调的是人工智能中“仿人”的概念与自动控制的结合。

2. 智能控制三元交集论

美国普渡大学 (Purdue University) 的萨里迪斯 (Saridis) 等人于 1977 年从机器智能的角度出发，提出了智能控制三元交集论。认为智能控制是人工智能、自动控制和运筹学的交集。如图 1-2 和式 (1-2) 所示。

$$IC = AC \cap AI \cap OR \quad (1-2)$$

式中 OR——运筹学 (Operation Research)。

三元交集论中除“智能”与“控制”之外，还强调了更高层次控制中调度、规划和管理的作用。

3. 智能控制四元交集论

1989 年中国学者蔡自兴教授提出了智能控制四元交集论，即认为智能控制是自动控制、

人工智能、运筹学和信息论的交集。可用图 1-3 和式 (1-3) 表示。

$$IC = AC \cap AI \cap OR \cap IN \quad (1-3)$$

式中 IN——信息论 (Information Theory or Informatics)。

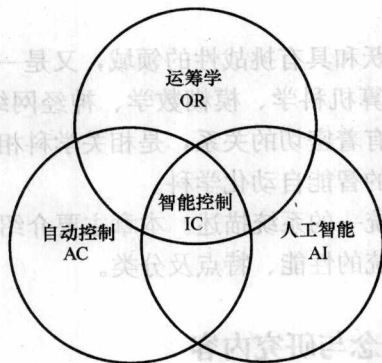


图 1-2 智能控制三元交集论结构

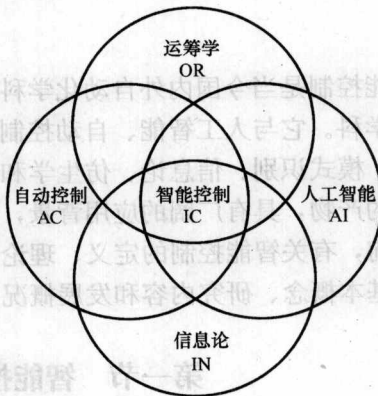


图 1-3 智能控制四元交集论结构

由以上理论可以看出，智能控制是一类无需（或仅需尽可能少的）人的干预就能够独立的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。

尽管智能控制的定义可以有多种不同的描述，不同的研究者从不同的侧面出发，阐述各自的观点，但从工程控制角度看，它的三个基本要素是：智能信息、智能反馈、智能决策。相对基于精确模型的传统控制，智能控制是以知识为基础，以智能决策为核心。如果说自动控制使人们从繁重的体力劳动中解放出来的话，那么，智能控制则试图将人们从复杂的脑力劳动中解放出来。

二、智能控制的主要研究内容

智能控制是当前国内外人士谈论智能、自动化、计算机技术领域中的热门课题，受到学术界、工程界和企业界的广泛关注，他们积极进行有关智能控制的理论方法和应用技术的研究与开发工作，取得了许多新进展、新成果。

然而，应当看到，智能控制目前仍只处于开创性研究阶段，最多可以说进入了初期发展阶段。目前国内外智能控制研究方向及内容主要有：

- (1) 智能控制的基础理论和方法研究；
- (2) 智能控制系统结构研究；
- (3) 基于知识系统的专家控制；
- (4) 基于模糊系统的智能控制；
- (5) 基于学习及适应性的智能控制；
- (6) 基于神经网络的智能控制系统；
- (7) 基于信息论和进化论的学习控制器研究；
- (8) 基于感知信息的智能控制系统；
- (9) 其他，如计算机智能集成制造系统、智能计算系统、智能并行控制，智能容错控制、智能机器人等。

三、智能控制的研究对象

智能科学的研究对象具有下列一些明显的特征。

1. 复杂性

智能科学要研究的对象,无论是自然科学和技术问题、社会和经济问题或是微观世界以至人的思维过程等都是很复杂或比较复杂的系统和很难或比较难以用传统方法处理的问题。复杂性体现在控制对象的复杂性,环境的复杂性和控制任务或目标的复杂性。

控制对象的复杂性主要有:模型的不确定性、高度非线性、分布式的传感器和执行机构、动态突变、多时间标度、复杂的信息模式、庞大的数据量和严格的性能指标。

环境的复杂性主要包括环境变化的不确定性、难以辨识、必须与被控对象集合起来作为一个整体来考虑。

控制任务或目标的复杂性主要体现在控制目标和任务的多重性、时变性和任务集合处理的复杂性。

2. 交叉性

智能控制具有明显跨学科交叉特征。正是这种交叉特征,融合了相关学科的长处,犹如生物界杂交培育出优势种群一样,创造出更具有生命力的新兴学科。

3. 非线性

非线性经常伴随复杂性存在,智能科学要研究的对象或系统,一般存在有严重的非线性,无法用线形方程和一般数学方法处理,甚至很难用非线性微分方程描述和处理。

4. 拟人(仿生)性

智能科学要研究的对象或系统往往是拟人或仿生系统。例如,模拟人脑的思维活动和决策过程,模仿昆虫爬行过程、鸟的飞行和鱼的游动过程等。研究这类对象时,需要借鉴脑科学和仿生学等学科的研究成果,并与其他相关学科密切结合。

5. 不确定性

不确定性又称模糊性,是指系统或问题含有不确定的结构、参数或其他信息。如天气预报下雨的可能性为45.6%。这个预报则属结论的不确定性。智能科学研究对象大多具有这种不确定性。

6. 不完整性

不完整性有别于不确定性,是智能科学研究对象的又一特征。所得到的对象系统或问题的相关信息是确定的,但又不完全的。对于具体问题来说,在特定环境下,无法得到更完全的信息。智能科学应当能够依据不完整的信息,通过非完全模型做出科学决策,进行有效的处理。

7. 分布性

智能科学所研究的许多对象具有分布特性,这一方面与系统的复杂性有关,另一方面也与某些对象或系统固有的时空分布特性以及系统的并行性和交叉性有关。分布性如果运用得当,对系统进行分布处理,有利于系统的信息集成和处理。

8. 非数学过程

智能科学的多数研究对象往往不存在传统的数学模型和已知算法,无法进行建模和数值计算。

智能科学所具有的这些特征,使得其问题求解难度要比一般非智能科学大。已经提出了

一些比较有效的智能化方法和技术,用于处理智能科学面临的问题。例如,采用知识表示和推理技术以启发信息引导问题求解过程,可使一些难题迎刃而解。

第二节 智能控制系统的性能与特点

一、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,其一般结构如图 1-4 所示。图中,广义控制对象表示通常意义上的被控制对象和所处的外部环境。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,它根据给定任务的要求、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,通过常规控制器和执行机构作用于控制对象。

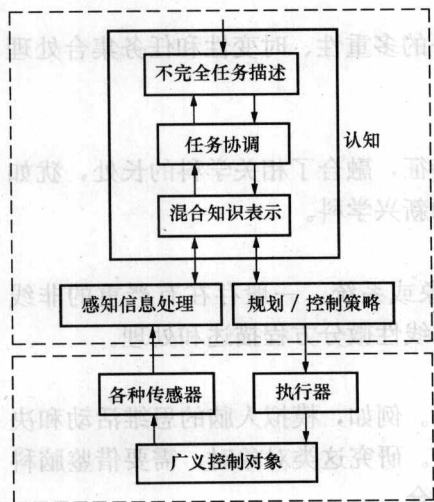


图 1-4 智能控制系统的一般结构

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别。

二、智能控制的性能

智能控制主要用来解决包括经典控制和现代控制理论在内的传统控制难以解决的复杂系统的控制问题。根据智能控制的基本控制对象的开放型、复杂性和不确定性的特点,一个理想的智能控制系统应具有如下性能。

1. 学习能力

系统对一个未知环境提供的信息进行识别、记忆和学习,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. 适应功能

系统应具有适应受控对象动力学特性变化、环境变化和运行条件变化的能力。这种智能行为实质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,与传统的自适应控制中的适应功能相比较具有更广泛的意义。除此之外,系统还应具有容错性和鲁棒性,即系统对各类故障应具有自诊断、屏蔽和自恢复的功能,以及对环境干扰和不确定性因素的不敏感功能。

3. 组织功能

对于复杂任务和分散的传感器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。

除以上功能外,智能控制系统还应具有相当的在线实时响应能力和友好的人机界面。以保证人机互助和人机协同工作。

三、智能控制的特点

(1) 智能控制具有混合控制特性。智能控制是同时具有以知识表示的非数学广义模型和以数学模型表示的混合控制过程,也往往是那些含有复杂性、不完全性、模糊性或不确定性以及不存在已知算法的非数值过程,并以知识进行推理,以启发来引导求解过程。

(2) 智能控制的核心在高层控制,即组织级。高层控制的任务在于对实际环境或过程进行组织,即决策和规划,实现广义问题求解。这些问题的求解过程与人脑的思维过程具有一定的相似性,即具有不同程度的“智能”。

(3) 智能控制是一门边缘交叉学科。智能控制涉及许多的相关学科。智能控制的发展需要各相关学科的配合与支援。智能控制是目前自动控制发展的最前沿阶段。

(4) 智能控制是一个新兴的研究领域。无论在理论上还是实践上,智能控制都还很不成熟、很不完善。需要进一步探索与开发。

第三节 智能控制系统的分类

智能控制系统一般包括分级递阶控制系统、模糊控制系统、神经网络控制系统、专家控制系统和学习控制系统等。在实际运用中,根据情况既可单独使用,也可以几种方法和机制结合在一起,用于一个实际的智能控制系统或装置,从而建立起混合或集成的智能控制系统。

一、分级递阶控制系统

分级递阶智能控制(Hierarchically Intelligent Control)是在自适应控制和自组织控制基础上,由美国普渡大学(Purdue University) Saridis 提出的智能控制理论。分级递阶智能控制主要由三个控制级组成,按智能控制的高低分为组织级、协调级、执行级,并且这三级遵循“精度随智能降低而增加(IPDI)”原则,其功能结构如图 1-5 所示。

1. 组织级(Organization Level)

组织级通过人机接口与用户(操作员)进行交互,它代表控制系统的主导思想,执行最高决策的控制功能,监视并指导协调级和执行级的所有行为;这一级涉及知识的表示与处理,并由人工智能起控制作用;它是分级递阶智能控制系统的最高级,是智能控制系统的大脑,具有组织、学习和决策能力。能对输入语句进行分析,能辨识控制情况,能在大致了解任务执行细节的情况下,组织任务并提出适当的任务形式。组织级要求具有低精度和高的智能决策及学习功能。

2. 协调级(Coordination Level)

协调级是组织级和执行级间的接口,涉及决策方式及其表示,采用人工智能及运筹学实现控制。它是智能控制系统的次高级,主要任务是协调各控制器的控制作用或协调各子任务执行。

3. 执行级(Executive Level)

执行级是智能控制系统的最低层,它按控制论进行控制,对相



图 1-5 分级递阶智能控制系统结构

关过程执行适当的控制作用。执行级要求具有较高的精度和较低的智能。

由图 1-5 可知,自上而下智能程度越来越低,控制精度越来越高。

二、模糊控制系统

1965 年美国加州大学的 L. A. Zadeh 教授在其发表的著名论文“Fuzzy Set”中,首次提出用“隶属函数”的概念来定量描述事物模糊性的模糊集合理论,并提出了模糊集的概念。这个概念试图用连续变量测量对象在某类集合中的占有程度,而不像传统集合那样,只有“属于”,“不属于”两种状态。模糊集的思想反应了现实世界所存在的客观不确定性与人们在认识中出现的不确定性。模糊集合的模糊性是针对在所划分的类别与类别之间无明显的隶属到不隶属的转折。事实上客观世界绝大多数事物,说它们属于某一类或不属于某一类都不存在明显的分界线。

模糊控制(FC, Fuzzy Control)是以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的一种计算机数字控制,是一种正在兴起的能够提高工业自动化能力的控制技术。模糊控制属于智能控制的范畴,而且它已成为目前实现智能控制的一个重要而有效的形式。凡是无法建立数学模型或难以建立数学模型的场合都可以采用模糊控制技术。

模糊控制就是在被控制对象的模糊模型的基础上,运用模糊控制器近似推理手段,实现系统控制的一种方法。模糊模型是用模糊语言和规则描述的一个系统的动态特性及性能指标。

模糊控制的基本思想是用机器去模拟人对系统的控制。它是受这样事实而启发的:对于用传统控制理论无法进行分析和控制的复杂系统(往往很难建立其数字模型),有经验的操作者或专家却能取得比较好的控制效果,这是因为他们凭借的是日积月累的丰富经验,因此人们希望把这种经验指导下的行为过程总结成一些规则,并根据这些规则设计出控制器,然后运用模糊理论、模糊语言变量和模糊逻辑推理的知识,把这些模糊的语言上升为数值运算,从而能够利用计算机来完成对这些规则的具体实现,达到以机器代替人对某些对象进行自动控制的目的。

模糊控制的特点是:一方面,模糊控制提供了一种实现基于自然语言描述规则的控制规律的新机制;另一方面,模糊控制器提供了一种改进非线性控制器的替代方法,这些非线性控制器一般用于控制含有不确定性和难以用传统非线性理论来处理的装置。

模糊控制单元的基本功能结构如图 1-6 所示。它由模糊化、规则库、模糊推理和清晰化 4 个功能模块组成。



图 1-6 模糊控制单元基本功能结构图

模糊化模块实现对系统变量论域的模糊划分和对清晰输入值的模糊化处理。规则库用于存储系统的基于语言变量的控制规则和系统参数。模糊推理是一种从输入空间到输出空间的非线性映射关系。由于在模糊控制器中,控制规则的形式为

If 〈控制状态 A〉 then 〈控制作用 B〉

因此,如果已知〈控制状态 A'〉,则通过模糊推理推论出〈控制作用 B'〉。

清晰化模块将推论出的〈控制作用 B'〉转换为清晰化的输出值。

三、神经网络控制系统

神经网络是指由大量与生物神经系统的神经细胞相类似的人工神经元互连而组成的网

络;或由大量像生物神经元的处理单元并联互连而成。这种神经网络具有某些智能和仿人控制功能。

神经网络控制(NNC, Neural Network Control)是在控制系统中采用神经网络这一工具,对难以精确描述的复杂的非线性对象进行建模,或充当控制器、或优化计算、或进行推理、或故障诊断等,以及同时兼有上述某些功能的适当组合,这样的系统称为神经网络控制系统,将这种控制方式称为神经网络控制。

神经网络采用仿生学的观点与方法来研究人脑和智能系统中的高级信息处理。基于神经网络的控制器,其控制问题可以看作是另一类模式识别问题。要识别的模式是一些关于受控的状态、输出或某个性能评价函数的变化信号。这些信号经神经网络映射成控制信号,即使在神经网络输入信息量不充分的情况下,也能快速地对模式进行识别,产生适当的控制信号。控制效果由系统的评价函数来反映,该函数作为一类变化信号输入神经网络,以作为神经网络的学习算法或学习准则。

四、专家控制系统

专家指的是那些对解决专门问题非常熟悉的人们,他们的这种专门技术通常源于丰富的经验以及他们处理问题的详细专业知识。

专家系统主要指的是一个智能计算机程序系统,其内部含有大量的某个领域专家水平的知识与经验,能够利用人类专家的知识和解决问题的经验方法来处理该领域的高水平难题。它具有启发性、透明性、灵活性、符号操作、不确定性推理等特点。

专家控制是将专家系统的理论与技术同控制理论方法与技术相结合,在未知环境下,仿效专家的智能,实现对系统的控制。基于专家控制的原理所设计的系统称为专家控制系统。

应用专家系统的概念和技术,模拟人类专家的控制知识与经验而建造的控制系统,称为专家控制系统,专家控制目前主要有两种形式:专家控制系统(ECS, Expert Control System)和专家控制器(EC, Expert Controller)。

专家控制系统是一种已广泛应用于故障诊断、各种工业过程控制和工业设计的智能控制系统。

五、基于规则的仿人智能控制

从广义上说,各种智能控制方法研究的共同点,就是使工程控制系统具有某种“仿人”的智能,即研究人脑的微观或宏观的结构功能,并把它移植到工程控制系统中。仿人智能控制的基本思想是在控制过程中利用计算机模拟人的控制行为功能,最大限度地识别和利用控制系统动态过程所提供的特征信息,进行启发和直觉推理,从而实现对缺乏精确模型的对象进行有效的控制。

仿人智能控制所要研究的目标不是被控对象,而是控制器本身,即直接对人的控制经验、技巧和各种直觉推理逻辑进行检测、辨别、概括和总结,使控制器的结构和功能更好地从宏观上模拟控制专家的功能行为。

图1-7是仿人分层递阶智能控制系统。这里将递阶智能控制的思想(组织级、协调级和执行级)应用于控制器的设计中,并按照被控量偏差及偏差变化率的大小进行分层递阶控制,各分层控制策略采用仿人智能控制方案来实现工业过程控制系统的自动、稳定和优化运行。

这种分层递阶智能控制算法是:①当过程负荷大范围改变时(系统偏差较大),采用仿

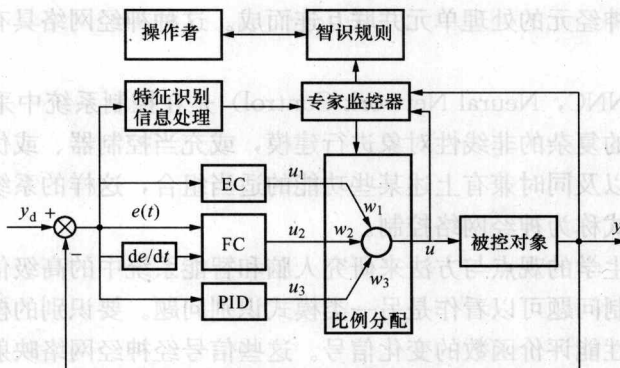
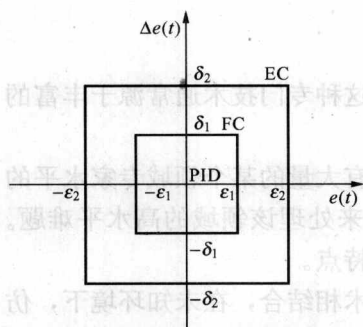


图 1-7 仿人分层递阶智能控制系统

图 1-8 分层递阶智能控制
算法的相平面图

人操作的专家控制策略；②当偏差 $e(t)$ 和偏差变化量 $\Delta e(t)$ 稍大时，选用模糊控制；③当偏差 $e(t)$ 和 $\Delta e(t)$ 均较小时，采用参数自整定 PID 控制和自寻优学习控制。上述分层递阶智能控制算法的相平面表示如图 1-8 所示。算法内层是自整定 PID 控制，第二层是模糊控制 (FC)，外层是专家控制 (EC)。这三个模块的工作状态可以在专家系统的监控下相互切换。

六、集成智能控制系统

将几种智能控制方法或机理融合在一起而构成的智能控制系统称为集成智能控制系统。举例如下。

1. 模糊控制与神经网络的融合

模糊系统和神经网络控制均可视为智能控制领域内的一个分支，有各自的基本特性和应用范围，如表 1-1 所示。它们在对信息的加工处理过程中均表现出很强的容错能力。模糊系统是仿效人的模糊逻辑思维方法设计的一类系统，这一方法本身就明确地说明了系统在工作过程中允许数值型的量不精确性存在。另一方面，神经网络在计算处理信息的过程中所表现出的容错性来自于其网络自身的结构特点。而人脑思维的容错能力，正是源于这两个方面的综合：思维方法上的模糊性以及大脑本身的结构特点。此外，模糊系统善于表达人的经验性知识，可以处理带模糊性的信息，这是神经网络做不到的；但另一方面模糊系统的规则集和隶属函数等设计参数只能靠经验来选择，很难自动设计和调整，这是模糊系统的主要缺点。因此若能用神经网络来构造模糊系统，就可以利用神经网络的学习方法，根据输入输出样本来自动设计和调整模糊系统的设计参数，实现模糊系统的自学习和自适应功能。根据这一想法产生了模糊神经网络系统。

表 1-1

模糊系统与神经网络的比较

技 术	模 糊 系 统	神 经 网 络	技 术	模 糊 系 统	神 经 网 络
知识获取	人类专家 (交互)	采集数据集 (算法)	推理方法	启发式搜索 (低速)	并行计算 (高速)
不确定性	定量与定性 (决策)	定量 (感知)	适应能力	低	很高 (调整连接权值)

模糊神经网络是一种集模糊逻辑推理的强大结构性知识表达能力与神经网络的强大自学习能力于一体的新技术,它是模糊逻辑推理与神经网络有机结合的产物。一般来讲,模糊神经网络主要是指利用神经网络结构来实现模糊逻辑推理,从而使传统神经网络没有明确物理含义的权值被赋予了模糊逻辑中推理参数的物理含义。

神经网络与模糊系统的结合,还只是最近几年的事情。美国学者 B. Kosko 在这方面进行了开创性的工作,做出了许多的贡献。在他新近出版的《Neural Networks and Fuzzy Systems》一书中,系统地研究和总结了神经网络和模糊系统的一般原理和方法,对神经网络在模糊系统中的应用研究起了很大的推动作用。

模糊神经网络是近几年来智能控制与智能化领域的热点之一,它的研究成果大量涌现,并取得了许多理论和应用成果。目前已经提出了许多模糊神经网络,比较著名的有模糊联想记忆 (FAM)、模糊自适应谐振理论 (F-ART)、模糊认知图 (FCM) 和模糊多层感知机 (FMLP) 等。

目前神经网络与模糊技术的融合方式,大致有下列三种:

(1) 神经元、模糊模型。该模型以模糊控制为主体,应用神经网络,实现模糊控制的决策过程,以模糊控制方法为“样本”,对神经网络进行离线训练学习。“样本”就是学习的“教师”。所有样本学习完以后,这个神经网络,就是一个聪明、灵活的模糊规则表,具有自学习、自适应功能。其结构如图 1-9 所示。

(2) 模糊、神经模型。该模型以神经网络为主体,将输入空间分割成若干不同型式的模糊推论组合,对系统先进行模糊逻辑判断,以模糊控制器输出作为神经元的输入。后者具有自学习的智能控制特性。其框图如图 1-10 所示。

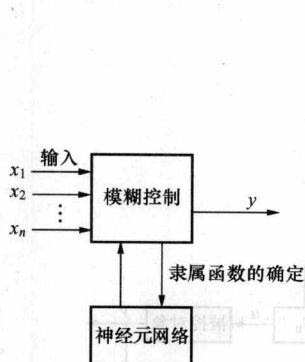


图 1-9 神经元、模糊模型结构

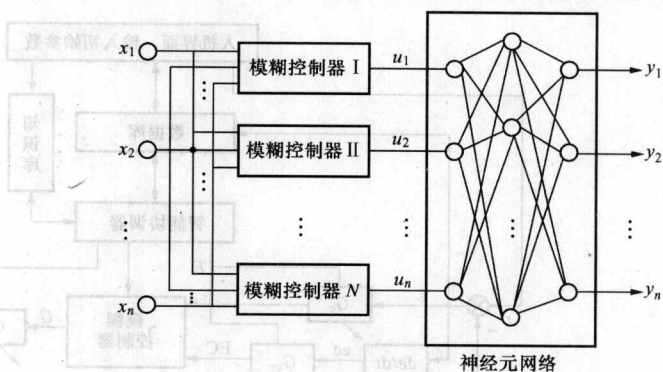


图 1-10 模糊、神经模型结构

(3) 神经元与模糊模型。该模型根据输入量的不同性质分别由神经网络与模糊控制进行直接处理输入信息,直接作用于控制对象,更能发挥各自的控制特点。其框图如图 1-11 所示。

2. 基于遗传算法的模糊控制系统

遗传算法 (GA, Genetic Algorithm) 是一种基于自然选择和基因遗传机制,根据适者生存、优胜劣汰法则而形成的一种创新的人工优化搜索算法。遗传算法的中心问题是鲁棒性,所谓鲁棒性是指在许多不同的环境中通过效率及功能之间的协调平衡以求生存的能力。

模糊控制是基于模糊集合论,模拟人的近似推理的方法。但是其控制规则在推理过程中