

Microcontroller Fuzzy Logic Control

单片机模糊逻辑控制

余永权 曾 碧



北京航空航天大学出版社

Microcontroller Fuzzy Logic Control

单片机模糊逻辑控制

余永权 曾 碧

北京航空航天大学出版社

(京)新登字 166 号

图书在版编目(CIP)数据

单片机模糊逻辑控制/余永权编著. —北京:北京航空航天大学出版社,1995.6

ISBN 7-81012-525-7

I. 单… II. 余… III. 单片微型计算机-模糊逻辑:模糊控制
IV. TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 05993 号

内 容 简 介

模糊控制是目前在控制领域所采用的三种智能控制方法中最具实际意义的方法。模糊控制的采用解决了大量过去人们无法解决的问题,并且在工业控制、家用电器和各个领域已取得了令人瞩目的成效。本书是一本系统地介绍模糊控制的理论、技术、方法和应用的著作;内容包括模糊控制基础、模糊控制器、模糊控制系统、模糊控制系统的稳定性、模糊控制系统的开发软件,用单片微型机实现模糊控制的技术和方法,模糊控制在家用电器和工业上应用的实际例子;反映了模糊控制目前的水平。

本书内容丰富、取材新颖、理论性和实用性俱优,是一本无论从先进性、完整性和易读性角度来说都十分吸引人的书。

本书可作从事模糊控制开发应用的广大研究人员、技术人员进行模糊控制系统开发的参考书,也可以为大学的自动化类、电子类、机械类、计算机类高年级学生的教材或相应专业的研究生教材。

- 单 片 机 模 糊 逻 辑 控 制**
- 书 名: DANPIAN JI MOHU LUOJI KONGZHI
 - 编 著 者: 余永权 曾碧
 - 责任编辑: 韦秋虎
 - 出 版 者: 北京航空航天大学出版社 邮编 100083
 - 印 刷 者: 铁道部第十八工程局印刷厂印刷
 - 发 行: 新华书店总店科技发行所
 - 经 售: 北京航空航天大学出版社发行科 电话 2015720
全国各地书店
 - 开 本: 16
 - 印 张: 33.25
 - 字 数: 851 千字
 - 印 数: 6 000 册
 - 版 次: 1995 年 7 月第一版
 - 印 次: 1995 年 7 月第一次印刷
 - 书 号: ISBN 7-81012-525-7/TP·136
 - 定 价: 40.00 元

前 言

自从电子计算机诞生以来,人们就希望计算机能具有智能并取代人进行各种智能活动。但是,纵使人们进行了这方面的大量和不懈的努力与探索,其结果仍然是十分不尽人意的。人们不得不承认,就进行智能活动这方面的能力而言,计算机的水平仍处于十分孱弱的境地。其原因在于,人们虽然取得了电子计算机这种硬件物理基础,而在人类智慧的模拟上还未能找到一套合适的理论方法。

模糊逻辑和神经网络理论的发展给人们展示了进行人类智慧模拟的新曙光。

模糊逻辑应用最有效并最广泛的领域就是模糊控制。模糊控制在各种领域出人意料地解决了传统控制方法无法或难以解决的问题,并取得了令人触目的成效。现在,人们已经明确地知道:模糊控制是目前在控制领域中所采用的三种智能控制方法中最具实际意义的方法。

在人类社会和自然界中存在各种有待人们去研究的奥秘,而人类的智能研究是最为重要的。人类的智能带有精确和模糊的特征。在数值计算上,人们的思维是表征为精确性的;但在对事物的学习、推理、统筹方面,人们的思维就表征为模糊性。事实上,人们在日常生活中以模糊性处理事物的时间居多,而以精确性进行计算的机会居少。思维的模糊性形成了人类斑驳的社会。

模糊控制就是建立在人类思维模糊性的基础上的。模糊控制与传统控制有着本质的区别,它不象经典控制那样需要用精确数字所描述的传递函数,也不象现代控制理论那样需要用矩阵表示的状态方程。模糊控制的核心是在于它用具有模糊性的语言条件语句,作为控制规则去执行控制。控制规则往往是由对被控过程十分熟悉的专门人员给出的,所以模糊控制在本质上来说是一种专家控制。这种控制的控制规则充分反映了人的智能活动。

传统控制方法以数学公式描述控制过程,往往可以给出十分严密和明确的数学表述。模糊控制以语句规则描述控制过程,使习惯了用精确数学刻画控制过程的人们感到不易适应和迷惑。实际上,模糊控制是以一种与传统精确数学完全不同的数学——模糊数学为基础理论建立起来的。它有一整套和传统控制方法完全不同的理论和方法。何况,一种技术是否先进,是以其在实际中应用是否取得良好效果而体现的,绝不仅是因对其冗长的论证或美妙的描述就会优秀起来。模糊控制这种技术,尽管其理论系统尚未完善,但其大量应用的超常成效足以表明它是一种前途无量的技术。

近年来,模糊控制在我国渐渐引起了广泛的重视,从事各种工业控制、设备自

动化、家用电器智能化、单片微型机应用等方法研究、技术开发的科研人员、工程技术人员、大学教师、研究生、大学生都纷纷加入模糊控制研究和实际应用的行列中。在这种情况下,人们急需一本系统地介绍模糊控制的理论性和实用性相结合的书。

根据作者十多年来所进行的模糊控制研究以及对十届研究生所讲授的“模糊控制”课程内容,加上作者对模糊家用电器及模糊工业控制系统开发的一些实例;同时,结合近几年来国内外模糊控制研究的各种新成果,从而写成这本《单片机模糊逻辑控制》专著。希望能够通过这本书给读者提供模糊控制的系统概貌、模糊控制有关理论和方法、模糊控制的开发技术、模糊控制的应用实例,对所有感兴趣的读者有所裨益。

本书共分成 10 章,内容按从基础到实质,再到应用这种顺序进行编排。第一章介绍模糊逻辑和神经网络的发展;第二章介绍模糊逻辑的理论基础;第三章介绍模糊控制基础;在这一章不但介绍了模糊控制中有关模糊化、反模糊化及控制规则等内容,还介绍了模糊控制的神经网络方法;第四章介绍模糊控制器的结构及模型;第五章介绍模糊控制系统的辨识、设计和稳定性;第六章介绍用数字单片机实现模糊控制的方法;第七章介绍用模糊单片机实现模糊控制的方法;第八章介绍模糊控制的开发软件;第九章给出模糊控制在家用电器中的具体应用例子;第十章给出模糊控制在工程上应用的实际例子。

在全书 10 章内容中,余永权写其中的第一、二、三、五、七、八、九、十章;曾碧写其中的第四、六章。全书由余永权负责策划编目、文稿修正和审定。

作者在写作过程中得到广东工学院有关科研教学部门的支持,在此表示由衷的感谢。特别感谢广东省高等教育局,该局在十多年前就立项,向作者拨出专门研究模糊控制的经费,使作者得以开展长期的模糊控制的研究。同时,还要深深感谢广东工学院科研处,作者在十多年进行模糊控制研究的过程中,该处从经费和各方面都给予积极的帮助和促进。作者在这本书中的有关成果,是在上述单位和部门的大力支持下所取得的。

本书在写作过程中,力求做到叙述准确、结构恰当、条理分明、内容系统、文字易懂、深入浅出;但由于作者水平有限,加上教学工作紧张,科研任务繁重;所以,难免会存在各种谬误和不足。在此,诚恳地希望广大读者多给以批评指正。

作者于广东工学院
一九九四年十月

目 录

第一章 模糊逻辑、神经网络集成电路的发展

§ 1.1 模糊逻辑及其集成电路的发展	(1)
1.1.1 模糊逻辑的诞生和发展	(1)
1.1.2 模糊集成电路的发展进程	(4)
§ 1.2 神经网络及其集成电路的发展	(7)
1.2.1 神经网络的形成历史	(7)
1.2.2 神经网络集成电路的发展	(11)
§ 1.3 模糊逻辑和神经网络的结合	(14)
1.3.1 模糊逻辑和神经网络结合的意义	(15)
1.3.2 模糊逻辑和神经网络结合的前景	(16)

第二章 模糊逻辑及其理论基础

§ 2.1 模糊集合与隶属函数	(21)
2.1.1 模糊集合概念	(21)
2.1.2 隶属函数	(22)
2.1.3 分解定理与扩张定理	(28)
2.1.4 模糊数	(30)
§ 2.2 模糊关系、模糊矩阵与模糊变换	(33)
2.2.1 模糊关系	(33)
2.2.2 模糊矩阵	(37)
2.2.3 模糊变换	(40)
§ 2.3 模糊逻辑和函数	(43)
2.3.1 模糊命题	(43)
2.3.2 模糊逻辑	(45)
2.3.3 模糊逻辑函数	(50)
§ 2.4 模糊语言	(56)
2.4.1 语言及语言的模糊性	(56)
2.4.2 模糊语言	(58)
2.4.3 语法规则和算子	(62)
2.4.4 模糊条件语句	(65)
§ 2.5 模糊推理	(71)
2.5.1 模糊推理的CRI法	(72)
2.5.2 模糊推理的TVR法	(76)
2.5.3 模糊推理的直接法	(78)
2.5.4 模糊推理的精确值法	(83)
2.5.5 模糊推理的强度转移法	(92)

第三章 模糊控制基础

§ 3.1 模糊控制的系统结构	(98)
§ 3.2 精确量的模糊化	(106)
3.2.1 语言变量的分档	(107)
3.2.2 语言变量值的表示方法	(109)
3.2.3 精确量转换成模糊量	(112)
§ 3.3 模糊量的精确化	(116)
3.3.1 最大隶属度法	(117)
3.3.2 中位数法	(118)
3.3.3 重心法	(120)
§ 3.4 模糊控制规则及控制算法	(121)
3.4.1 模糊控制规则的格式	(121)
3.4.2 模糊控制规则的生成	(124)
3.4.3 模糊控制规则的优化	(132)
3.4.4 模糊控制算法	(143)
§ 3.5 模糊控制的神经网络方法	(153)
3.5.1 神经元和神经网络	(154)
3.5.2 神经网络的分布存储和容错性	(161)
3.5.3 神经网络的学习算法	(164)
3.5.4 神经网络实现的模糊控制	(174)
3.5.5 神经网络构造隶属函数	(181)
3.5.6 神经网络存储控制规则	(184)
3.5.7 神经网络实现模糊化、反模糊化	(193)

第四章 模糊控制器

§ 4.1 模糊控制器结构	(202)
§ 4.2 模糊控制器设计	(204)
4.2.1 常规模糊控制器设计	(204)
4.2.2 变结构模糊控制器设计	(212)
4.2.3 自组织模糊控制器设计	(218)
4.2.4 自适应模糊控制器设计	(231)
§ 4.3 模糊控制器的数学模型	(234)
4.3.1 常规模糊控制器的数学模型	(235)
4.3.2 模糊控制器数学模型的建立	(236)

第五章 模糊控制系统

§ 5.1 模糊系统的辨识和建模	(240)
5.1.1 模糊系统辨识的数学基础	(241)
5.1.2 基于模糊关系方程的模糊模型辨识	(254)
5.1.3 基于语言控制规则的模糊模型辨识	(260)
§ 5.2 模糊控制系统的设计	(268)
5.2.1 模糊控制系统的一般设计过程	(269)

5.2.2	模糊控制系统的典型设计	(278)
§ 5.3	模糊控制系统的稳定性	(297)
5.3.1	稳定性分析的 Lyapunov 直接法	(297)
5.3.2	语言规则描述的模糊控制系统的稳定性	(302)
5.3.3	关系方程描述的模糊控制系统的稳定性	(309)
第六章 数字单片机与模糊控制		
§ 6.1	数字单片机 MC68HC705P9	(318)
6.1.1	MC68HC705P9 单片机性能概论	(318)
6.1.2	MC68HC705P9 单片机基本结构	(320)
6.1.3	MC68HC705P9 指令系统	(340)
§ 6.2	数字单片机模糊控制方式	(349)
6.2.1	数字单片机与模糊控制关系	(349)
6.2.2	数字单片机模糊控制方式	(349)
第七章 模糊单片机与模糊控制		
§ 7.1	模糊单片机 NLX230	(375)
7.1.1	模糊单片机 NLX230 性能概况	(375)
7.1.2	NLX230 的结构及引脚	(376)
7.1.3	NLX230 的模糊推理方式	(379)
7.1.4	NLX230 的内部寄存器	(382)
7.1.5	NLX230 的操作及接口技术	(384)
§ 7.2	NLX230 开发系统	(389)
§ 7.3	NLX230 应用例子	(395)
第八章 模糊控制的开发软件		
§ 8.1	模糊推理机原理	(402)
§ 8.2	模糊推理机的算法	(406)
§ 8.3	模糊推理机结构和清单	(411)
§ 8.4	模糊逻辑知识基发生器	(415)
§ 8.5	模糊推理开发环境	(430)
8.5.1	FIDE 的工作条件	(430)
8.5.2	FIDE 的结构	(432)
8.5.3	FIDE 的工作过程	(433)
第九章 模糊控制在家用电器中的应用		
§ 9.1	模糊控制的电冰箱	(437)
9.1.1	电冰箱模糊控制系统结构	(437)
9.1.2	模糊控制规则和模糊量	(439)
9.1.3	控制系统的电路结构	(442)
9.1.4	控制规则的自调整	(445)
§ 9.2	模糊控制的电饭锅	(447)
9.2.1	煮饭的工艺过程曲线	(447)
9.2.2	模糊控制的逻辑结构	(448)

9.2.3	模糊量和模糊推理	(450)
9.2.4	控制软件框图	(454)
§ 9.3	模糊控制的微波炉	(456)
9.3.1	控制电路的结构框图	(456)
9.3.2	微波炉的模糊量与推理	(459)
9.3.3	微波炉控制电路结构原理	(464)
9.3.4	控制软件原理及框图	(467)
§ 9.4	模糊控制的洗衣机	(469)
9.4.1	模糊洗衣机控制系统逻辑结构	(470)
9.4.2	模糊洗衣机的模糊推理	(472)
9.4.3	洗衣机物理量检测方法	(474)
9.4.4	布质和布量的模糊推理	(477)
第十章 模糊控制在工程上的应用		
§ 10.1	模糊参数自适应 PID 控制器	(482)
10.1.1	自校正 PID 控制器	(482)
10.1.2	模糊参数自适应 PID 控制系统结构	(485)
10.1.3	模糊控制规则的产生	(486)
10.1.4	模糊推理机理及运行结果	(489)
§ 10.2	恒温炉模糊控制	(493)
10.2.1	恒温炉模糊控制的系统结构	(493)
10.2.2	模糊控制器及控制规则的形成	(495)
10.2.3	模糊控制器的校正	(502)
§ 10.3	感应电机模糊矢量控制	(505)
10.3.1	模糊矢量控制系统结构	(506)
10.3.2	矢量控制的基本原理	(509)
10.3.3	模糊电阻观测器	(511)
10.3.4	模糊控制器及运行	(514)
附录 所用的符号及意义说明		(519)
参考文献		(520)

第一章 模糊逻辑,神经网络集成电路的发展

模糊逻辑,神经网络是两个截然不同的研究领域;但是,它们的目的却又不谋而合,因为它们都是用于研究人们的智能的。尽管模糊逻辑和神经网络所追求的目标是如此相同,而它们的实现方法和研究方法却相距甚远。模糊逻辑企图从人的思维外特性,即语言和对世界认识的概念上去研究人的智能;神经网络则是力图从人脑的物理结构上去研究人的智慧产生和形成。虽然,这两种方向的研究方法如此不一致,但不妨碍人们在人的智能研究这一目标上的进步;在研究过程中当然出现过各种困难和低潮,但是人们坚持不懈的努力,终于使这两种方向的研究越来越接近于目标;在近年来已取得了不少的成果。当然,距离最终目的还有很长的道路;但是,所得的成果足以令人振奋的了。目前,研究出来的模糊逻辑和神经网络集成电路是这两种研究的一大进步。这种集成电路的诞生,使模糊逻辑和神经网络不再受过去二进制计算机的能力限制,使它们在实际应用和广泛应用上开辟了一条令人鼓舞的光明之路。

§ 1.1 模糊逻辑及其集成电路的发展

模糊逻辑是 Fuzzy Logic 的中文译意。在英文中,Fuzzy 一词有“模糊”的意思,也有“不分明”和“边界不清晰”的意思。故曾有人把这个英文单词译成“勿晰”。但是,现在人们都接受了“模糊”这一译意。Fuzzy Logic 译成“模糊逻辑”也就是顺理成章的事了。

过去,人们所熟知的逻辑学中,包括传统逻辑和数理逻辑。传统逻辑是指亚里士多德所创立的古典逻辑;数理逻辑则是数学家兼哲学家莱布尼茨创始的逻辑。在数理逻辑中,现在人们最熟悉的是布尔逻辑,也就是二值逻辑。而模糊逻辑对人们来说,是较为陌生的。在这一节中,介绍模糊逻辑的诞生、概念、以及模糊逻辑发展历程,和模糊逻辑集成电路的发展进程。

1.1.1 模糊逻辑的诞生和发展

1965 年,美国的伊朗裔自动控制理论专家扎德(L. A. Zadeh)在加州大学提出了模糊集合理论以来,模糊逻辑就得到了迅速的发展。

经典数学是以精确方法来描述事物的。在人类的社会发展过程中,记数的结果产生了数学。而在漫长的人类历史发展中,计算是一种最常用的方法;而经典数学在计算中发挥了巨大的作用;并且,从而产生了精确数学的各种分支,从代数、平面几何、解析几何、微积分、复变函数、概率与数理统计,泛函分析、运筹学、规划学、拓扑学等。在经典数学中,所用到变量、函数、相关关系,全部都是用精确的数值表示的。人类社会也因应用了经典数学这个工具,而在社会建设中取得了极大的成功。无论是生物学、物理学、化学、或是应用工程技术,都充满着经典精确数学的功绩。

随着社会进步和科学技术的发展,人们渐渐发现,现在的精确数学在解决一些问题时往往会显得十分繁琐或者甚至束手无策。

精确数学一般用微分方程来描述自然科学的某些基本规律或系统的。但在实际中有的系统所涉及的因素极多,而每个因素之间还存在耦合的关系;同时,系统所处的条件也千变万化;要用微分方程来描述这种系统,或者要设定大量的约束条件,并且对系统进行简化,以简化后的结果去用微分方程表示;或者根本无法用微分方程描述这样的系统。很明显,简化后产生的微分方程不能准确地说明原来的系统,求解之后意义可能不大,而有的微分方程也是难以求解的。至于无法用微分方程表示的系统也就不可能求解了。

有的学科,例如语言学、心理学、文学、生物学和社会科学,过去是极少采用数学方法去解决问题的;往往是采用文字方法进行定性的推理或估计。随着科学技术的发展,人们对这些学科的准确性提出了更高的要求;因此,在这些学科中解决问题就需要定量化和数学化。但是,在这些学科中,大多问题都是具有模糊性。比如,语言的“幽默”、“流畅”;心理的“正常”,“不平衡”;文学作品的“通俗”“严肃”等;都是模糊的概念。很明显,用传统的精确数学是无法对这些学科进行数学化和定量分析的。

在一切科学中,人类本身的智能研究是最为重要的。人的智能本身就具有精确和模糊两种特征。对于各种计算,人的思维是具有精确性的;而对于各种事物的识别、归纳、推理、学习、经验就具有模糊性。著名的控制论创始人维纳在指出人能超过任何最完善的机器时,明确指明其重要的原因是“人具有运用模糊概念的能力”。实际上,人在社会中,运用精确概念的机会不多,而且往往局限于数值计算方面。相反,人运用模糊概念的时间则是占了他生活的大部分。首先,为了生活,人们必须要考虑衣、食、住、行;这就牵涉到“冷暖”、“食物的好坏优劣”,“住的舒适程度”,“交通的拥挤和繁忙”等,这些都是模糊的概念。在工作中处理人与人的关系,对工作的决策中也存在“亲疏远近”“上策”“中策”“下策”等问题,这些都是模糊概念。这些具有模糊概念和性质的问题,采用精确数学的方法是无法恰当解决的。

既然,大量的模糊问题难以用传统的精确数学进行解决。人们就不得不寻找新的出路,期望用一种全新的数学工具去求解模糊问题。在这种背景之下,就产生了和精确数学有巨大区别的数学——模糊数学。模糊数学是解决模糊问题的钥匙和有效工具。

美国加州大学教授扎德(L. A. Zadeh)在1965年提出的《Fuzzy Set》论文开创了模糊逻辑的历史,从此模糊数学这门科学渐渐发展起来。在《Fuzzy Set》这篇论文中,扎德提出了一个表示事物模糊性的重要概念——隶属函数。这个概念是模糊数学的精髓所在。通过隶属函数,人们才能对所有的模糊概念进行定量表示。扎德创造了隶属函数可以说是伟大的创举,自从有了隶属函数,人们才可能去研究那些边界不明的模糊事物和状态。

模糊数学是一种数学工具,它以数学方法去解决各种具有模糊性的问题。模糊数学不是模模糊糊,糊里糊涂的数学;也不是把原来清晰明确的事物变成不清不白的数学。恰恰相反,模糊数学以隶属函数去恰当地描述事物的模糊性,并且把具有模糊现象和模糊概念的事物处理成精确的东西。

模糊逻辑是模糊数学的一个分支学科,模糊逻辑在模糊控制,模糊语言,模糊计算机等领域都有着重大的应用价值和前途。人们现在所较熟悉和接触较多的是布尔逻辑,即二值逻辑,因为它是数字电子计算机的基础。在二值逻辑中,通常用到逻辑命题;所谓命题,就是一个可以确定真假的有意义的句子。对一个命题来说,它只能是真或是假,两者必居其一。如果命题为真,则称命题的真值为“1”;如果命题为假,则称命题的真值为“0”。模糊逻辑和二值逻辑不同,模糊逻辑是一种连续逻辑。一个模糊命题是一个可以确定隶属度的句子,它的真值取 $[0,1]$ 区间中的任何数。很明显,模糊逻辑是二值逻辑的扩展,而二值逻辑只是模糊逻辑的特殊情况;所

以,模糊逻辑有着普遍的意义。

1965年,扎德发表了《Fuzzy Set》之后;到1966年,马里诺斯(P. N. Marinos)发表了模糊逻辑的研究报告。严格地说,模糊逻辑这时才是真正诞生。后来,扎德又提出模糊语言变量这个重要的模糊逻辑概念。到1974年时,扎德又进行模糊逻辑推理的研究。从此,模糊逻辑成为人们研究的一个热门课题。

1974年,伦敦的Queen Mary学院的马丹尼(E. H. Mamdani)首次用模糊逻辑和模糊推理实现了第一个试验性的蒸汽机控制,并取得了比传统的DDC控制更好的效果。它的成功也标志着人们采用模糊逻辑进行工业控制的开始,从而宣告了模糊控制的问世。

1975年到1976年间,荷兰Delft高等工业学校的莱姆基(V. N. Lemke)和基科特(W. Kickert)研究了热水站的模糊控制,使这个用传统方法难以进行控制的多变量非线性对象实现了稳定可靠的控制。

1976年,丹麦高等工业学校的拉森(P. M. Larson)和奥斯特加德(J. J. Ostergaard)也进行了热交换器模糊控制的试验;对象是一个双输入双输出系统,并且有很强的耦合作用和非线性特性,其控制效果良好。与此同时,英国曼彻斯特大学的拉瑟福德(D. A. Rutherford)、卡特(G. A. Carter)和黑格(M. J. Hague)在英国钢铁公司Middlesborough的一个烧结厂对原料的湿度进行模糊控制,并实现了卓有成效的烧结。英国剑桥大学的汤哥(R. Tong)把模糊控制用于英国钢铁公司Battersea的一台炼钢转炉。

1976~1977年,英国Stevenage的Warren Spring实验室的金(P. J. King)和马丹尼等人合作,用模糊控制对反应器进行温度控制。这个系统是一个大延时的惯性系统,闭环时系统不稳定。在控制中,他们采用模糊模型的预估方案,从而成功解决了不稳定的问题。

1976年,马丹尼对同一台蒸汽机开发出了自组织模糊控制器,这种控制器可以在运行过程中学习模糊规则。稍后,马丹尼和普罗素克(T. Procyk)研究出扩展的自组织模糊控制系统和多输入多输出的自适应模糊控制器。同时,昂伯(I. G. Umber)和金也研究出了水泥回转窑中模糊控制的方法。此后,丹麦的拉森等人也在烧煤湿法的水泥回转窑中应用模糊控制取得了成功。

1977年,帕皮斯(C. Pappis)和马丹尼等人用模糊控制的方法进行十字路口的交通管理,并取得了良好的效果。

1979年,中国的李宝缙,刘志俊等人开始了模糊控制器的研究工作。他们用连续数字仿真的方法研究了模糊控制器的性能,并和传统的PI控制器的性能进行了比较,指出了模糊控制器有响应速度快、过渡时间短,对参数变化不敏感等优点。

1980年,英国的汤哥在Norwich怀特林汉处理厂采用模糊控制器进行污废水处理。他用了20条模糊控制规则的稀疏算法。

1980年,陈国权对模糊控制器的算法进行了研究。郑维敏等用模糊集理论讨论和分析了模糊控制器的鲁棒性。宋大鹤和汪培庄等先后对模糊控制器的电路实现、软件设计进行了研究。

1981年,王以治、舒永昌等对模糊语言和模糊文法进行了研究。龙升照等人则对人机系统中模糊变量的隶属函数,和模糊控制的自调整形式也进行了研究。

1982年,陈永义对模糊逻辑中的模糊算子进行了探讨。朱剑英对磨床研磨表面光洁度进行模糊控制。邓聚龙、彭国忠等研究了利用模糊数字仿真与辅助设计,解决多目标模糊积分系统的最优设计问题。李从心在开关式液压位置伺服系统中利用模糊控制方法,取代多级继电器

的控制方法。应行仁对采用最大隶属度决策方法的模糊逻辑控制器进行了分析。

1983年,日本日光制造厂系统开发研究所的安信等人,用预测模糊控制方法对电气化铁路列车的运行和停止进行了控制,并达到节能11%~14%的效果。中国的宋大鹤对模糊控制方法提出了一种新的算法。中国的唐多元和日本的寺野寿郎、菅野道夫用模糊推论的方法建立过程的语言模型,以表示生产过程动态特性。邓聚龙对模糊控制过程的稳定性问题进行了研究,并提出了有关模糊控制的稳定性条件。

1984年,涂象初提出了把模糊控制和常规调节器相结合组成混合型的调节器。

1985年,日本九州工业大学的前田、村上等对汽车的速度使用模糊控制,有加速平滑,上、下坡能稳定行走的效果。荷兰的拉金(L. I. Larkin)对飞机着陆的模糊控制进行了研究。中国的陈永义、汪培庄提出了模糊逻辑推理中最优模糊蕴涵和近似推理的直接方法。而涂象初等研制出模糊PID调节器,并给出了自寻优的方法。

1986年,中国的李东辉开展了对模糊控制规则自调整、模糊控制系统寻优及其仿真研究。日本的安信等人把模糊控制用于港口集装箱起重机的小车行走和卷扬提升机的运行控制。彭映斌在高温烧结过程中应用了模糊群控,取得了满意的温度控制精度,并可节能10%左右。随后,我国模糊控制应用的例子渐渐增加。

1988年,邓聚龙提出了最小信息量的最优模糊控制。1990年,陈常祥提出了自寻优模糊控制。近年来,日本兴起了模糊控制热,目前,模糊控制已渗透到家用电器。日本现在已有模糊电饭煲、模糊洗衣机、模糊微波炉、模糊空调机等在市场上出现。

随着科学技术的发展,模糊逻辑和模糊控制的应用会越来越多,越来越广泛,以模糊逻辑为基础的模糊计算机正在孕育之中,在不久的将来也会投入实际应用。

1.1.2 模糊集成电路发展进程

模糊集成电路也称模糊芯片,它是指把各种半导体电路集成在一片芯片上而能执行模糊运算或推理的器件。或者说,可以执行模糊理论所提出的各种运算的集成电路称为模糊集成电路。

目前,推出市场的模糊集成电路还不多,其运算都是以模糊理论所提出的运算为基础的,模糊数学中的运算有下列典型的算法:模糊集合的求补,模糊集合的逻辑积,模糊集合的逻辑和,还有各种代数积,界限积,代数和,界限和以及各种推理运算;逆模糊,即精确化运算等。

1980年,日本熊本大学山川烈副教授试制出第一个模糊集成电路。这个模糊集成电路可以进行基本模糊逻辑运算,不过未能执行模糊推理。在这片集成电路中,采用电流方式的运算电路,以0~5 μ A电流表示隶属函数的值[0,1]区间。这个电路依据克希荷夫第一定律执行电流加法,并可以执行模糊逻辑的界限差运算。界限差运算的定义如式(1.1)所示:

$$I_1 \ominus I_2 = (I_1 - I_2) \vee 0 \quad (1.1)$$

而逻辑积运算,界限积运算是可以通过电流执行加法和界限差来实现的。

逻辑积的执行如式(1.2)所示

$$I_1 \wedge I_2 = \begin{cases} I_1 \ominus (I_1 \ominus I_2) \\ I_2 \ominus (I_2 \ominus I_1) \end{cases} \quad (1.2)$$

从式(1.2)中可知:当 $I_1 > I_2$ 时,执行的结果是 I_2 ;而当 $I_1 < I_2$ 时,执行的结果是 I_1 。

界限积的执行如式(1.3)所示:

$$I_1 \odot I_2 = (I_1 + I_2) \ominus 1 \quad (1.3)$$

很明显,式(1.3)执行的结果不能超过值“1”,所以,这是一个以“1”为界限的积。

因此,把电流加法和界限差运算作为基本运算,就可以组成有9种运算的模糊集成电路。这种集成电路的运算有逻辑补运算、逻辑和、逻辑积、界限积、界限和、界限差、绝对差、蕴含、对等运算。

作为第一片模糊集成电路,它只能执行有限的模糊逻辑运算,而无法执行模糊推理。所以,它的功能并不理想;但作为模糊集成电路来说,这是一种开创性的工作;它的产生标志模糊逻辑集成化的历史的开始。

1985年,在美国AT&T的贝尔研究所工作的户贝方规,渡边浩之等试制成功了可进行模糊推理的集成电路。这个模糊集成电路采用CMOS工艺的数字式电路;它采用4位数据表示16个离散值0000~1111。这16个离散值分别对应于隶属函数的值 $[0,1]$ 区间的有关值。这种对应关系分别是:

0000 对应隶属函数的值 0;

0001 对应隶属函数的值 $1/15$;

0010 对应隶属函数的值 $2/15$;

.....

1111 对应隶属函数的值 1。

该模糊集成电路推理采用Max-Min法,其片内含有16条模糊推理规则,模糊集成电路的速度用每秒模糊推理次数,即FLIPS表示。这个模糊集成电路的速度为8万FLIPS。在一片集成电路中实现了推理,也被称为“AI on chip”,也即是片内人工智能。所以,也有人称这种模糊推理集成电路为“智能芯片”,或“AI芯片”。

1986年,户贝方规和渡边浩之离开贝尔研究所。渡边浩之到北卡罗莱纳州大学任教,并把模糊推理集成电路有关技术提供给北卡罗莱纳州微电子中心MCNC。由MCNC和德州仪器公司进行这种集成电路的产品开发和生产。在1989年年初试制出新的模糊集成电路,其推理能力为58万FLIPS。户贝方规则在洛杉矶自行开设了TIL公司,并且开发出FC110模糊推理集成电路。FC110是68引脚的数字集成电路,推理速度为10万FLIPS。以这个集成电路FC110为核心的模糊推理加速插件也试制出来,并可用于IBM微机系统。

1988年,熊本大学副教授山川烈研制成功了电压方式工作的模糊推理集成电路。这种电路以 $[0V, 5V]$ 的模拟电压值来表示隶属函数值 $[0,1]$ 。并且执行Max-Min合成重心算法,芯片的左半部是执行一条Max-Min合成规则的芯片,右半部是执行重心计算的非模糊化芯片。

在同年,Rock Well公司国际科学中心的S. Chiu博士和户贝方规博士推出模糊推理速度为250KFLIPS的模糊推理芯片。同时,山川烈还研制成功了世界第一个模糊计算机微处理器这个微处理器采用了“规则”芯片和“解模糊”芯片这两种芯片相结合。这个微处理器不仅象普通处理器那样接受数字信息,而且能够以模糊方法进行推理和运算。模糊微处理器的推理速度为1MFLIPS。在此期间,日本东京法政大学工学部利用模糊触发电路开发出能记忆模糊信息存储器。

特别值得指出的是,1988年日本法政大学广田薰教授和京都微机公司开发出虚拟分页存储器方式的模糊推理集成电路。这个集成电路可用于在高性能工作站上进行模糊推理仿真。这种芯片以虚拟分页方式对ROM和RAM寻址,推理的结果存入芯片中。而且,其推理速度高

达 600 万 FLIPS。

1989 年,佛罗里达州的微器件公司发表了可以对两个模糊隶属函数值进行比较的模糊逻辑集成电路。这种集成电路型号为 MD1210,它采用 $1.2\mu\text{m}$ CMOS 工艺制成,可以单独用于进行隶属函数比较,也可以用其组成神经网络。

在 1989 年以来,开始有专门的生产厂家进行模糊集成电路的生产。

1991 年,美国的 Neural Logix 公司把多种模糊集成电路投入市场。这些模糊集成电路有模糊样本比较器 NLX110;模糊数据相关器 NLX112、NLX113;模糊微控制器 NLX230。

模糊样本比较器,也称模糊模式比较器,英文缩写为 FPC(Fuzzy Pattern Comparator)。NLX110 用于大量实时数据的并行样本比较,在那些执行不精确或有干扰的实时数据样本比较的系统中可以简化执行的过程。样本比较是用海明距离或线性距离来量度的。在一片 FPC 中,8 种数据可以和一种样本进行比较。

模糊数据相关器,英文缩写为 FDC(Fuzzy Data Correlator)。NLX112 是高速可编程的 CMOS 模糊数据相关器,可用于实时数据和图象处理系统。这个集成电路可以由用户选择相关度,也即是调节相关阈值。在芯片内,采用并行比较结构,故可以计算出输入数据和参考数据样本的海明距离。相关操作速度最高为 50MHz。

NLX113 模糊数据相关器的结构和 NLX112 类同,它的功能比 NLX112 要强。主要体现在下面几点:

1. NLX112 只有一种数据比较方式,即 128 位比较方式;NLX113 则有 32 位、64 位和 128 位三种比较方式。

2. 用户可以把 NLX113 组成 4 组 32 位相关器,2 组 64 位相关器或单组 128 位相关器。

3. NLX113 有自动相关能力和交叉相关能力。

模糊微控制器的英文缩写是 FMC(Fuzzy Microcontroller)。模糊微控制器 NLX230 是超大规模集成电路,它用于各种非线性的系统控制。模糊微控制器根据输入的状态,用模糊逻辑运算原理去求最佳输出。模糊微控制器可以执行高达每秒 3 000 万条规则的处理速度。在模糊微控制器中含有 16 个模糊化电路,这种模糊电路也称模糊器,它可以对输入实行模糊化。在芯片内,再执行最小比较运算,然后又执行最大比较运算。实际上,也即是在 FMC 内部执行逻辑积-逻辑和运算,通常称为逻辑乘-逻辑加运算。故而,在 FMC 内部是采用 Max-Min 推理的。

在模糊微控制器 NLX230 内,每个模糊器都可以从 8 个数据输入端 DI0~DI7 中的任一输入端输入数据。每一个时刻,一个模糊器只能从一个输入端输入数据;也即是输入的数据是串行输入到模糊器中去的。模糊器把输入数据和隶属函数的中心位置(Center Location)进行比较,从而求出输入数据的隶属度。数据输入模糊器是由串行时钟 SK 进行同步的。一般来说,从 DI0~DI7 中的任何一端输入的 8 位串行数据组成了一个输入值。规则存储器含有 512 条规则。这些规则各含 16 位,每位分别和一个模糊器对应;规则用于指明那些模糊器有效,而那些模糊器无效。每条规则用一个 16 位的规则寄存器存储;某位为“0”,表示对应的模糊器有效;某位为“1”,表示对应的模糊器无效。很明显,每个规则寄存器的值则确定了对模糊器的选择情况,也即是确定了一条规则。

Neural Logix 公司还宣布,在 1992 年的第二季度将推出三种新的模糊微控制器。第一种称为 NLX231,它是以 NLX230 结构为基础的扩展结果。第二种是一种结构有较大变化的模糊微控制器,它的型号为 NLX232;这种 FMC 的内部处理器是 NLX231,但是含有模拟量和数字量的输入和输出,内部并含有 E²PROM 和定时器。第三种型号是 NLX233;这种模糊微控制器

的结构和 NLX232 相同,但是内部含的是掩模 ROM 不是 E²PROM。

在 Neural Logix 公司的四种型号的模糊控制器中,NLX230 只是一种基本型,它的功能还是较为单一的,在本质上只能执行模糊化和模糊推理。对于应用而言,还需附加一些部件。NLX231 虽然扩展了 NLX230 的结构,但仍然和实际应用的要求来说,还觉有点不足。而 NLX232 和 NLX233 内部由于含有模拟和数字的输入输出,同时还有定时器及 E²PROM 或 ROM,故而在实际应用中会给用户带来更大的方便,对用惯了数字型单片机的用户来说尤其如此。

§ 1.2 神经网络及其集成电路的发展

神经网络在不同的学科中,它的意义稍有不同。在医学中,神经网络是指生物神经网络 Biological Neural Network;而在信息科学中,神经网络是指人工神经网络 Artificial Neural Network. 有时,也把生物神经网络简写为 BN²,把人工神经网络简写为 AN²。

长期以来,人们一直在探讨人是如何进行智能活动的。医学家和心理学家都从不同角度去对人的智能进行分析和论证。但一直未能取得合理的结果。后来,人们提出了神经网络理论。随着时间的推移和研究工作的开展,神经网络的理论研究和应用都取得了较大的进展,近年来,美、日及欧洲各国都掀起了神经网络研究的热潮;并且投入大量人力物力进行神经网络的硬件和软件研究,企望取得突破性的进展。

神经网络的主要特征体现在下列几点:

1. 它具有并行处理的能力。
2. 它具有分布式信息存贮的特点。
3. 它有很好的自适应性和自组织性。
4. 它具有良好的学习功能,联想功能和容错功能。

现在,各国仍然在对神经网络进行深入研究。神经网络理论还在不断发展之中。在这一节中,介绍神经网络的发展情况和目前神经网络集成电路的进展。

1.2.1 神经网络的形成历史

在长期的科学技术发展中,人们也曾对人本身进行了很多研究;这些研究主要体现在医学和心理学上。后来,随着信息学的产生和发展,信息学家也介入了对人的研究,而这种研究主要是对人的智能的研究,各种学科的科学家人脑的理解和探索角度是不一样的。

生物医学家企图从解剖学的角度来说明人的行为和人脑在这种行为中的作用。

心理学家则希望从人的记忆、思维、联想心理活动的特征上来解释人脑的思想活动机理。

信息学家就试图从脑的拓扑结构,信息的传递,信息的存储方式,信息的加工方式来阐述脑的功能,并模拟人脑的工作功能。

生物、心理和信息这三个学科的科学家人不断地对人脑的研究和互相影响,渐渐形成了一个新的学科,也就是神经网络。

19 世纪中叶,西班牙解剖学家 Cajal 创建神经元学。Cajal 等人发现在人脑中是由大量神经细胞组成了神经网络的。神经细胞是构成神经网络的最基本单元,故而也把神经细胞称为神

神经元。神经元的形状呈根状两极伸展,其中含有细胞体和树突,细胞体和树突从其他神经元接收刺激;并由轴突把神经冲动信号传到其端部的神经末梢。

但是,神经元学在较长的一段时间内并没有很大的进展。直到1943年,美国的心理学家麦卡洛克(W. S. McCulloch)和数学家皮茨(W. A. Pitts)共同合作提出了神经元的数学模型,即M-P模型;从而开创了神经网络理论研究的历史。M-P模型把神经元看作一个逻辑元件,并以此来描述神经网络的功能;因此,M-P模型称为二值神经元阈值模型。

1949年,霍布(D. O. Hebb)根据心理学中条件反射的机理,对人工神经网络的学习方式进行了研究;并提出了改变神经元之间结合强度来进行学习的方法,即是Hebb学习法。这个学习法则认为:两个同时处于兴奋状态的神经元之间,它们的突触连接强度得到加强。这一法则是和心理学中的“条件反射”观点相一致的,同时,也在神经细胞学中得到了证实。Hebb学习法则的基本思想至今仍在各种神经网络的研究之中起重要作用。

50年代初期,生理学家Hodykin和数学家Huxley对神经细胞膜的等效电路进行了研究,并把细胞膜上离子的迁移变化去分别用可以变化的 Na^+ 电阻和 K^+ 电阻进行等效;当时给出了有重大的影响的Hodykin-Huxley方程。

人工智能的网络系统研究是从50年代中期开始的。

1954年,Farley和Clark提出了随机网络中自适应的激励-响应关系模型。这是神经网络中智能式模型研究的最早探讨。

1957年,罗森布拉特(F. Rosenblatt)提出了感知机(Perceptron)概念,它由阈值性神经元构成,用以模拟人脑的感知和学习能力;这是第一个学习型的神经网络模型。

1962年,温德罗(B. Windrow)提出了一种可以学习的自适应线性元件(Adaline),它是一种连续取值的线性网络,能够学会识别一些简单的图形,如字母等。这种神经网络模型主要用于自适应系统。它的连续取值特点和当时占了主导地位的以顺序离散符号推理为基本特征的人工智能AI的研究途径完全不同;故而引起了人们的极大兴趣,但也由其产生了大量的争议。

1969年,人工智能的创造人之一明斯基(M. Minsky)和佩珀特(S. Papert)出版一本叫做《感知机》(Perceptron)的书。这是他们对感知机的功能及局限性从数学角度进行了较长时间深入研究的结果。明斯基是麻省理工学院著名的人工智能专家,他认为感知机这一类单层神经网络的功能十分有限,甚至对一些十分简单的逻辑运算也无法解决;而大量的模式是不可能由简单的单层网络训练;同时,对多层网络的可行性尚未有把握,故而,把感知机引入到多层网络的研究是没有意义的。明斯基在人工智能研究领域中的崇高威望使他的言论对当时的人工智能领域研究人员有极大的影响,因此,他在《感知机》一书中的悲观结论无疑给神经网络在感知机方向上的研究打上一个休止符。在此后多年中,神经网络的研究一直处于低潮状态。其中当然有多个原因。第一个原因是明斯基的低调论述影响研究人员的研究方向;第二个原因是当时尚未能找到一种神经网络有效的算法;第三个原因是集成电路正处于高速发展阶段,以冯·诺依曼(Von Neumann)结构为基础的数字电子计算机的运算及存储水平大大提高;以数字电子计算机为基础的人工智能得到了迅速发展,并取得了令人触目的成绩。大多数研究人员都以为只要进一步改进数字电子计算机的性能和发展优良的软件,就可以使人工智能向人脑的功能逼近。这种偏向使人们减轻了对神经网络的重视,也掩盖了人工智能技术研究的其它方向。

十分难能可贵的是,在神经网络的低潮中仍有部分研究人员坚持不懈地进行神经网络的研究。他们没有受当时世界上学术界潮流的影响,而是刻心致力于神经网络这门学科的探索。