

FUZZY CONTROL

模糊控制

• 李士勇 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

模糊控制

李士勇 编著

哈尔滨工业大学出版社

内 容 提 要

模糊控制是一种应用微机模拟人脑模糊逻辑推理的数字控制形式,它属于非线性控制、智能控制范畴。目前它已成为对缺少精确数学模型的复杂非线性对象进行精确有效控制的最重要、应用最广泛的智能控制形式。本书共8章,内容包括智能模拟基础、模糊逻辑基础、模糊控制原理与模糊控制器设计、解析描述的模糊控制器、模糊系统辨识与模糊预测、自适应模糊控制、模糊控制的实现技术、模糊控制的工程应用实例。

本书具有起点低、由浅入深、深入浅出、启发思维、理论联系实际的特点,可作为自动化类大学高年级本科生和研究生教材,也可供相关专业科研人员、工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

模糊控制/李士勇编著. —哈尔滨:

哈尔滨工业大学出版社, 2011. 9

ISBN 978-7-5603-3246-8

I. ①模… II. ①李… III. ①模糊控制

IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 038388 号

责任编辑 田新华

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 14.25 字数 355 千字

版 次 2011 年 9 月第 1 版 2011 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-3246-8

定 价 38.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

无论是经典控制理论还是现代控制理论都需要被控对象的精确数学模型,因此面对日益复杂的高度非线性、时变性及不确定性等被控对象的控制问题,它们受到了极大的挑战。而不基于对象精确数学模型的智能控制理论为解决复杂非线性对象的控制难题,提供了一种崭新的方式。模糊控制是目前实现智能控制的最重要、应用最广泛的形式。

维纳创立控制论一开始就和作为高级生物人的智能决策行为联系在一起,只不过是后来由于控制领域专家、学者把控制论应用到工程的过程中,乃至在创立经典控制理论和现代控制理论的过程中,过分依赖于被控对象的精确建模,而忽视了人的智能决策行为的利用;另一方面,由于在过去较长时期内计算机技术还不够发达,即使控制工作者想到利用人的智能控制决策行为,也难以应用计算机进行实现。

国际控制界享有盛誉的瑞典奥斯特隆姆(K. J. Astrom)教授指出:控制论是维纳在研究动物(包括人)和机器内部的通信与控制时创立的,当时提出了许多新概念,目前,这一领域似乎又回到了发现新概念的时代;美国乔治(F. H. George)教授在《控制论基础》一书中指出:控制论的基本问题之一就是模拟和综合人类智能问题,这是控制论的焦点。

1965年美国加利福尼亚大学扎德(L. A. Zadeh)教授创立了模糊集合理论,为人们利用计算机模拟人脑模糊逻辑推理的智能决策行为提供了重要的数学工具。1974年,英国马丹尼(E. H. Mamdani)博士将模糊逻辑与自动控制相结合,设计的世界上第一个模糊控制器并用于实验室蒸汽机控制获得极大成功,开辟了应用模糊控制之先河。应该指出,研究模糊控制的目的并不是要把控制理论搞得模模糊糊,而是要通过引入模糊逻辑语言变量及它们之间构成的模糊关系进行模糊推理,从而,使微机控制进入那些基于精确模型无法控制的禁区,以便获得基于精确模型控制所无法达到的精确的控制效果。

近30年来,作者一直从事模糊控制、神经控制、智能控制、智能优化领域的理论与应用方面的研究和教学工作,曾作为高级访问学者在日本从事模糊控制、神经控制、智能控制方面的合作研究。在模糊控制、智能控制论域,作者先后出版过《模糊控制和智能控制理论与应用》(1990)、《模糊控制·神经控制和智能控制论》(1996初版,1998再版)两部著作。美国IEEE Fellow、田纳西大学洪箴(J. C. Hung)教授1997年曾指出:“李教授在模糊控制、神经网络控制和智能控制方面有深入的理论研究和特殊的学术造诣及贡献。”专著《模糊控制·神经控制和智能控制论》1999年获全国优秀科技图书奖。根据中科院信息中心提供的数据表明:该书跻身于十大领域中国科技论文被引频次最高的前50部专著与译著排行榜;由中国知网“中国期刊全文数据库”、“中国博士学位论文全文数据库”、“中国优秀硕士学位论文全文数据库”及“中国重要会议论文全文数据库”联网跨库高级检索获悉,该书自1996年出版至2010年底已被国内4600余篇论文引用。引用该书的论文学科领域涉及之广、涉及期刊种类达600种之多,即使是刚刚过去的2010年一年内还有多达350篇论文引用,令作者难以想象!

为了满足广大师生和科研人员学习模糊控制的需要,本书在撰写过程中凝炼了《模糊控制·神经控制和智能控制论》书中有关模糊控制内容的精华,并增加了新的内容。本书主要内容分为基础、理论、应用三大部分:第一部分(第1、2章)智能模拟和模糊逻辑基础;第二部分(第3~7章)模糊控制原理、模糊控制器设计、自适应模糊控制;第三部分(第7、8章)模糊控制的实现技术及工程应用实例。

本书是黑龙江省精品课程“模糊控制”的配套教材,也被列为哈尔滨工业大学“十二五”规划教材。

书中引用了部分国内外有关模糊控制的理论与应用成果,在此特向被引用的文献的作者致以诚挚的谢意!本书在撰写过程中,尽管作者力图由浅入深、深入浅出、启发思维,但是难免存在一些不足,恳请广大读者给予指正。

作 者

2011年5月于哈尔滨

目 录

第 1 章 智能模拟基础

1.1 思维科学	1	1.3.2 智能模拟的哲学基础	9
1.1.1 思维与思维科学	1	1.3.3 智能模拟的基本途径	9
1.1.2 思维的类型	2	1.4 智能模拟中的科学方法论	11
1.2 思维的神经基础	7	1.4.1 结构主义方法	11
1.2.1 思维与智能	7	1.4.2 行为主义方法	12
1.2.2 思维的神经基础	7	1.4.3 演绎主义方法	12
1.3 智能模拟基础	8	1.4.4 信息科学方法	12
1.3.1 智能模拟的科学基础	8	1.5 智能控制与智能模拟	13

第 2 章 模糊逻辑基础

2.1 模糊数学的创立及发展	14	2.5.1 隶属函数的确定方法	27
2.2 经典集合及其运算	16	2.5.2 常用的隶属函数	30
2.2.1 集合的概念及定义	16	2.6 模糊矩阵与模糊关系	32
2.2.2 集合的直积	17	2.6.1 模糊矩阵	32
2.2.3 映射与关系	18	2.6.2 模糊关系	36
2.2.4 集合的运算性质	18	2.6.3 模糊关系的合成	39
2.2.5 集合的表示及特征函数	19	2.7 模糊向量及其运算	41
2.3 模糊集合及其运算	20	2.7.1 模糊向量	41
2.3.1 模糊子集的定义及表示	20	2.7.2 模糊向量的笛卡儿乘积	41
2.3.2 模糊子集的运算	22	2.7.3 模糊向量的内积与外积	42
2.4 模糊集合与经典集合的联系	24	2.8 模糊逻辑与模糊推理	43
2.4.1 截集	24	2.8.1 模糊逻辑	43
2.4.2 分解定理	25	2.8.2 模糊语言	51
2.4.3 扩张原则	26	2.8.3 模糊推理	57
2.5 隶属函数	26		

第 3 章 模糊控制原理与模糊控制器设计

3.1 模糊自动控制原理	64		81
3.1.1 模糊控制的基本思想	64	3.2.5 论域、量化因子、比例因子的选择	85
3.1.2 模糊控制系统的组成	66	3.2.6 模糊控制查询表及算法流程图	88
3.1.3 模糊控制的基本原理	67	3.2.7 采样时间的选择	89
3.2 模糊控制器设计的基本方法	73	3.3 模糊控制器的设计举例	90
3.2.1 模糊控制器的结构设计	73	3.3.1 确定模糊控制器的结构	91
3.2.2 模糊控制规则的设计	75	3.3.2 建立模糊控制规则	91
3.2.3 精确量的模糊化方法	80	3.3.3 确定模糊变量的赋值表	92
3.2.4 模糊推理及其模糊量的非模糊化方法		3.3.4 建立模糊控制表	92

3.3.5 简单模糊控制器的控制特性	94
--------------------------	----

第4章 解析描述的模糊控制器

4.1 模糊控制规则的解析描述	98	4.3.2 带有多个调整因子的控制规则	102
4.2 带有调整因子的模糊控制规则	99	4.3.3 模糊控制规则的自寻优	102
4.3 模糊控制规则的自调整与自寻优	100	4.4 带有自调整因子的模糊控制器	104
4.3.1 带有两个调整因子的控制规则	101	4.5 带有自调整函数的模糊控制规则	105

第5章 模糊系统辨识

5.1 基于模糊关系模型的系统辨识	110	5.3 自适应模糊预测模型	116
5.1.1 模糊关系模型	110	5.4 基于 T-S 模型的模糊系统辨识	118
5.1.2 模糊关系模型的品质指标	111	5.4.1 T-S 模糊模型	118
5.1.3 基于模糊关系模型的建模方法	111	5.4.2 基于 T-S 模型的模糊系统辨识	120
5.2 基于模糊关系模型的建模举例	113		

第6章 自适应模糊控制

6.1 自适应模糊控制器的结构	123	6.3.4 MRFAS 系统稳定性能分析	135
6.2 自适应模糊控制器的原理	124	6.3.5 自适应模糊控制系统的仿真	136
6.3 模型参考模糊自适应控制系统	130	6.4 自校正模糊控制器	140
6.3.1 MRAS 系统的基本结构	130	6.5 自适应递阶模糊控制	145
6.3.2 MRFAS 系统的控制算法	131	6.5.1 系统变量与规则间的数量关系	145
6.3.3 基于 T-S 模型设计模糊自适应机构	134	6.5.2 自适应递阶模糊控制器的设计	146
		6.5.3 蒸汽锅炉的递阶模糊控制系统	149

第7章 模糊控制的实现技术

7.1 模糊控制软件的开发工具	151	7.1.5 模糊控制软件开发工具一览	160
7.1.1 Motorola 模糊控制软件	151	7.2 模糊控制芯片	161
7.1.2 美国 FIDE 模糊推理开发环境	152	7.2.1 模糊芯片发展概况	162
7.1.3 德国模糊逻辑系统软件工具 fuzzy TECH	153	7.2.2 模糊芯片的主要性能	163
7.1.4 MATLAB 模糊逻辑工具箱	155	7.2.3 模糊控制用芯片	165

第8章 模糊控制的工程应用实例

8.1 蒸汽发动机的模糊控制系统	168	8.2.3 模糊控制器和模糊自寻优控制器	174
8.1.1 概述	168	8.2.4 应用效果与结论	176
8.1.2 模糊控制器的结构	168	8.3 气炼机的自适应模糊控制系统	177
8.1.3 模糊变量的论域及其隶属函数	169	8.3.1 概述	177
8.1.4 控制规则	170	8.3.2 自动气炼机的结构及其工艺流程	178
8.1.5 模糊控制的结果	172	8.3.3 气炼机控制系统的硬件设计	178
8.2 模糊控制在退火炉燃烧过程控制中的应用	172	8.3.4 气炼机控制系统的软件设计	179
8.2.1 概述	172	8.3.5 自动气炼机的模糊控制器	181
8.2.2 模糊控制系统的组成	173	8.3.6 自动气炼机透烧、预烧延时的自适应模糊控制	182

8.3.7 小结	185	8.6.1 列车自动驾驶系统	195
8.4 电弧冶炼炉的模糊控制	185	8.6.2 地铁列车的预测模糊控制系统	196
8.4.1 概述	185	8.6.3 应用实例及其效果	199
8.4.2 模糊聚类分析	186	8.7 机器人的模糊控制	200
8.4.3 模糊控制规则	187	8.7.1 概述	200
8.4.4 控制系统的组成	188	8.7.2 模糊指令与模糊算法	201
8.4.5 小结	188	8.7.3 模糊指令的解释	201
8.5 高技术机翼的倾斜和力矩的模糊逻辑 控制	189	8.7.4 机器人的模糊控制	203
8.5.1 概述	189	8.7.5 机器人的控制过程	206
8.5.2 高技术机翼 ATW	189	8.8 模糊全自动洗衣机	206
8.5.3 ATW 的模糊控制	191	8.8.1 洗净度传感器	207
8.5.4 鲁棒性测试及结论	195	8.8.2 布量、布质传感器	208
8.6 预测模糊控制在列车自动驾驶系统中 的应用	195	8.8.3 基于洗净度的模糊推理	209
参考文献		8.8.4 基于布量、布质的模糊控制	210
		8.8.5 模糊全自动洗衣机的特点	212
			213

第 1 章 智能模拟基础

智能控制归根结底是要在控制过程中模拟人的智能决策方式,模拟人的智能实质上是模拟人的思维方式。本章主要介绍思维科学的基础,思维的形式,智能模拟的方法以及智能模拟的神经基础和哲学基础。

1.1 思维科学

随着生产自动化水平的不断提高和现代科学技术的迅猛发展,人类社会已经进入了信息社会,正在步入智能化的新时代。人们从来没有像今天这样重视信息在生产、生活、科研以及军事等方面的重要作用。由于人们面临着信息量大、传递迅速及复杂多变等特点,因此,对这些信息的获取、加工和处理变得更加困难和重要,于是人们才真正感到要研究和利用人认识世界的规律和方法,来提高人类自身的智能水平,并使机器首先是计算机智能化,就必须研究思维科学。

1.1.1 思维与思维科学

人们从不同角度研究思维的各个侧面已有悠久的历史。早在 20 世纪 80 年代初期,我国著名科学家钱学森教授就倡导开展思维科学的研究。与此同时,国外也开展了所谓认知科学(Cognitive Science)的研究,它主要分为认识心理学和人工智能两个领域,前者主要研究如何利用计算机仿真技术建立人的认知模型,后者侧重如何运用人的认识经验使机器,首先是计算机智能化。

国外的认知科学研究不涉及思维类型的基础理论研究,只重视从个体角度研究思维,尤其是尚未注重对形象思维机制的研究,因此被看做是狭义的思维科学。

思维是人脑对客观事物间接的反映过程。所谓间接的反映,意味着思维不是凭感觉器官对事物表象的直接认识,而是通过间接的甚至迂回的途径来反映客观事物的特点或它们之间的联系与规律。间接认识需要借助于已有的知识和经验,要间接地认识事物的特点、本质和规律,绝不可能靠消极、被动地反映事物的表面现象。必须靠自觉地、主动地在实践活动中占有材料,靠回忆有关的知识和经验或通过联想、推想、想象等对有关材料进行分析、综合,“去粗取精、去伪存真、由此及彼、由表及里”地加工改造,才能把握事物的本质,找出事物间的规律性联系,并有效地去改造客观事物。

人脑对客观事物的间接反映过程,包括回想、联想、表象、想象、思考、推想等。人们通过思维活动能够反映客观事物的特点、本质属性、内部联系及发展规律,因此,思维是认识过程的高级阶段。

意识是人的一种认识活动,它包括感觉、知觉和思维。思维是意识的一部分,而且是最主要的成分,假如没有思维,人就不会有意识。

思维科学是研究思维的规律和方法的科学,而不涉及对具体思维内容的研究。思维科学的基础科学是研究人有意识思维规律的科学,又称思维学。人的思维除了自己能够控制的意识以外,还有很多人脑不能直接控制的意识,即所谓的下意识。例如人走路开步走是人脑控制的,走了二三步后就“自动化”了,脑子并不去想该怎么走。要拐弯或遇到障碍时,又控制一下,所以,人确实有很多意识是没有经过大脑的,思维科学就是要研究人能够控制的那部分意识。

1.1.2 思维的类型

按照科学研究工作的需要,从思维规律的角度出发,思维可划分为抽象思维、形象思维和灵感思维三种类型。但是,人的思维活动过程往往不是一种思维方式在起作用,而是两种甚至三种先后交错在起作用。比如,人的创造性思维的过程就绝不是单纯的抽象思维,总要包含形象思维,甚至要有灵感思维充当创造性思维火花的导火线和催化剂。

1. 抽象(逻辑)思维学

抽象思维学又称逻辑思维学,这里讲的逻辑是指人的思维规律。逻辑学分为形式逻辑和辩证逻辑两大类。

(1) 形式逻辑

形式逻辑是研究人们思维形式的结构及思维的基本规律的科学。

思维形式的结构不是我们头脑中虚构出来的东西,而是客观现实的一种反映,它是客观事物的某种一般关系、特性的概括反映。如:“S 是 P”这个结构,它是“事物具有属性”这样一个事物的普遍性的反映;“M 是 P, S 是 M, 所以 S 是 P”是“全类是什么, 则全类事物中的一部分也就是什么”这样一种客观关系的反映。这种思维形式的结构是人类在长期实践活动中总结出来的产物。

思维的基本规律是运用各种思维形式时都必须遵守的规律。早在公元前 4 世纪,已经有希腊哲学家亚里士多德(B. C. Aristotle, 384~322 B. C.)创立了形式逻辑思维规律,即同一律、矛盾律和排中律。后来,到了 17 世纪末,德国哲学家莱布尼兹(G. W. Leibniz, 1646~1716)又增入了一条充足理由律,即组成了所谓的逻辑思维的四个初步规律。

从莱布尼兹开始,不少科学家和哲学家,特别是布尔(G. Boole, 1815~1864)和罗素(B. Russell, 1872~1970),把数学方法用于逻辑的研究,形成了数理逻辑这一学科,它可以看做是形成逻辑的一个特殊的分支。模态逻辑、多值逻辑、时序逻辑、模糊逻辑等,都属于数理逻辑这一范畴。形式逻辑又称传统逻辑,可以简称为逻辑。形式逻辑归根到底要解决的是思维的准确性问题。

(2) 思维形式

思维的形式就是概念、判断和推理。

概念是对客观事物的本质属性加以反映的思维形式。自然界及社会现象中的一切事物与现象,都具有许多性质。所谓性质就是事物所具有的那些相互区别、相互类似的一切质的、量的规定性,诸如数目、大小、速度、程度、动作、形态、特征、规律及关系等,都叫性质,它们是属于事物的,又称为事物的属性。属性可以分为本质的和非本质的两种。本质属性具有两个特点:其一,它是一个或一类事物内部所固有的规定性;其二,它具有把此事物和其他事物区别开的性质。本质属性一定是事物特有属性,而事物的特有属性却不一定是事物的

本质属性。作为思维形式之一的概念,所反映的是事物的本质属性。

概念包含两个方面,一是概念的内涵,一是它的外延。一个概念的内涵就是这个概念对象的本质属性,而它的外延就是这个概念所反映的全体对象。概念的内涵和外延是概念两个有机联系的方面,内涵是指外延对象的属性,外延是指具有内涵属性的对象。概念外延所构成的类就叫做集合。由此可见,研究集合就是从外延方面研究概念。逻辑学指出概念具有外延和内涵两个方面,为我们指出了一条明确概念、研究概念的途径。

判断和推理同概念一样,都是思维形式的一种。判断是概念与概念的联合,而推理则是判断与判断的联合。在普通逻辑中,判断是对思维对象有所断定的思想,即断定对象具有某种属性,或不具有某种属性,断定的结果是肯定或否定某种对象及其属性。这是判断的最基本的逻辑特征。如果断定的情况被实践证明是符合客观实际的,那么这个判断就是真的,否则就是假的。因此,任何判断或者是真的或者是假的,这种或真或假的性质叫做判断的值。这是判断的又一个基本特征。

推理是根据一个或一些判断获得一个新的判断的思维方式。任何一个推理都必须包含前提和结论两个组成部分。已有的一个(或一些)判断称之为前提,新的判断称之为结论。在形式逻辑中,推理可以从不同角度分成多种形式,如直接推理、间接推理、演绎推理、归纳推理、类比推理、模态推理等。

直接推理是指从一个前提推出结论的推理;间接推理是从两个或两个以上前提推出结论的推理;演绎推理是以一般的原理原则为前提,推到某个特殊的场合作出结论的推理方法;归纳推理是以若干个特殊的场合中的情况为前提,推求到一个一般的原理原则作为结论的推理方式;类比推理是以特殊的判断为前提,推出另一个特殊性的判断的推理方法;模态推理是最少有一个前提是模态判断的推理,所谓模态判断是对事物情况的性质加以判定的判断。

在科学论著中最常用的是演绎推理,它又分为三段论法和假言直言推理。三段论法是从两个判断(其中一个一定是“所有的S都是(或不是)P”的形式,S表示对象,P表示对象所具有的某种属性)得出第三个判断的推理方法。三段论包含着三个判断,第一个判断提供了一般的原理原则,称其为大前提;而第二个判断指出了在一个特殊场合的情况,叫小前提,联合这两个判断,说明一般原则和特殊情况间的联系,从而得出第三个判断,称之为结论。

假言推理和直言推理都属于演绎推理,假言推理的大前提是假言判断(是指肯定或否定对象在一定条件下具有某种属性的判断),小前提和结论是直言判断(无条件地肯定或否定某种事物的判断称直言判断)。

(3) 思维的基本规律

从上面论述的概念、判断和推理的思维形式可以看出,人们是按照一定的规律和逻辑结构去组织思想和进行思维的。逻辑的基本规律是客观事物的相对稳定性在思维中的反映,逻辑规律只是在思维活动中起作用,不在客观事物中起作用。事物的相对稳定性反映在思维中成为思维的确定性。思维的确定性表现为概念、判断的自身统一,这就是同一律;思维的确定性表现为概念和判断的前后一贯,不自相矛盾,这就是矛盾律;思维的确定性表现为两个相互矛盾的思想之间要作出抉择,排除中间的可能性,这就是排中律。

同一律是指在同一思维过程中,每一思想的自身都具有统一性,所谓思想的统一性是指概念或判断内容的同一性。科学研究的实践表明,任何一个严密的完整的科学体系都是符

合同一律要求的,如果违反了同一律的要求,科学研究就不能建立严密、完整的科学体系。

矛盾律是指在同一思维过程中,每个思想与其否定都不能同时为真,其中必有一假。矛盾律是把同一律思想进一步展开,指出既肯定又否定的思想是逻辑矛盾,不能同真。矛盾律是用否定形式表示同一律用肯定形式表示的思想。矛盾律的作用是使思维首尾一致,避免自相矛盾。任何一个科学理论都具有不矛盾性,一个科学理论,如果包含有逻辑矛盾,人们就会对它发生怀疑。在科学史上,许多科学上的突破,往往是从发现原有科学体系的逻辑矛盾并在设法消除这种矛盾的基础上,创立了新的理论体系。

排中律是指在同一思维过程中,两个互相矛盾的思想必有一个是真的。排中律又比矛盾律深入一层,明确指出两个矛盾思想不能同假,必有一真。在论证中,矛盾律只能由真推假,不能由假推真,而排中律不是由真推假,而是由假推真。

同一律、矛盾律和排中律都是思维确定性的表现,它们之间的关系是密切的,只不过是不同侧面表述思维的确定性。它们构成了逻辑思维的基本规律,所有正确的思维形式都是以这些思维的基本规律作为基础,要正确地进行思维,就必须遵守这些规律的要求。

(4) 辩证逻辑和数理逻辑

把高等数学关于变量等概念引进形式逻辑,促成了辩证逻辑的产生。辩证逻辑是关于思维运动的辩证规律的理论。

虽然形式逻辑和辩证逻辑都是研究思维形式,但是它们是从不同角度出发的。形式逻辑从抽象同一性角度研究思维形式,即把思维形式看做既成的相对稳定的范畴;辩证逻辑从具体同一性角度研究思维形式,即把思维形式看做对立统一、矛盾运动和转化的范畴。其次,形式逻辑的基本规律是同一律、矛盾律和排中律,它们虽有客观基础,但不是事物本质的规律;辩证逻辑的基本规律是对立统一、质量互变、否定之否定等规律,它们是客观事物本身的规律。

数理逻辑亦称符号逻辑,它源于形式逻辑,现已成为独立学科。数理逻辑是用数学方法研究推理、证明等问题的科学,主要内容为命题演算、谓词演算、递归论、证明论、集合论和模型论等。在形式化方面数理逻辑比形式逻辑更丰富、更发展。它用符号把概念、命题(判断)抽象为公式,把命题间的推理抽象为公式间的关系,并把推理转化为公式的推演。在数理逻辑中,用符号表示逻辑概念及其关系,常用符号“ $\rightarrow$ ”表示蕴含;“ $\neg$ ”表示否定;“ $\vee$ ”表示命题的析取(或);“ $\wedge$ ”表示合取(与);“ $\leftrightarrow$ ”表示等价。

数理逻辑关于形式语言的研究,为计算机语言提供了前提,而数理逻辑在计算机中的应用又推动了逻辑学的发展。辩证逻辑的建立和发展,对于提高人们的认识能力和推动形式逻辑、数理逻辑和电子计算机技术的发展具有非常重要的意义。

(5) 模糊逻辑和可拓逻辑

模糊逻辑是以模糊集合论为基础的,而传统的逻辑是以经典集合论为基础,通常称为二值逻辑,这种逻辑可以表述思维的确定性,但是它不能表述思维的模糊性。为了描述客观事物的模糊概念,美国加利福尼亚大学控制论专家扎德(L. A. Zadeh)教授在1965年发表了“模糊集合”的重要论文,从而创立了模糊数学。1975年扎德教授又出版了《模糊集合、语言变量及模糊逻辑》一书,标志着模糊逻辑的正式诞生。

在模糊逻辑中,将逻辑真值从普通的二值逻辑真值 $\{0,1\}$ 扩展到了 $[0,1]$,由于模糊逻辑真值在区间 $[0,1]$ 中连续取值,通过该真值的大小表明真的程度。因此,模糊逻辑实质上

是无限多值逻辑,也就是连续值逻辑,它为描述模糊概念及模拟人的模糊逻辑思维方式提供了强有力的工具。

将辩证逻辑和形式逻辑相结合产生了一种新的逻辑——可拓逻辑,它是以可拓集合为基础的。我国蔡文教授1983年发表了“可拓集合和不相容问题”的创见论文,目的在于研究解决现实世界中存在的不相容问题的规律和建立解决不相容问题的数学模型。论文中指出解决不相容问题,要考虑三个方面:一是必须涉及事物的变化及其特征;二是必须使用一些非数学方法;三是必须建立容许一定矛盾前提的逻辑。为此,建立了可拓集合的概念,以便讨论对象集内不属于经典子集而能转化到该子集内的元素,这是解决不相容问题的基础。

在逻辑关系上,与可拓集合相对应,建立了关联函数的概念,把逻辑真值从 $\{0,1\}$ 扩展到 $(-\infty, +\infty)$,用关联函数值的大小来衡量元素与集合的关系,使经典数学中“属于”和“不属于”集合的定性描述扩展为定量描述,以表征元素间的层次关系。

可拓逻辑能够描述事物的可变性,为解决客观世界中的矛盾问题提供了重要工具,它在识别、决策、评价、控制、信息处理等工程领域有着广阔的应用前景。

2. 形象(直觉)思维学

(1) 形象思维及其特点

形象思维简单地说,是凭借形象的思维。这种思维活动通过形象来思考和表述,它的主要思维手段是图形、行为等典型形象材料,它的认识特点是以个别表现一般,始终保留着事物的直观性,要求鲜明生动,思维过程主要表现为类比、联想、想象。

人的感觉器官接触到外界事物,通过大脑产生感觉,不同的感觉(视觉、听觉等)相互联系,经过综合以后形成知觉,知觉在脑中形成外界事物的感性形象,叫做映象,或称通过感性认识获得的表象,用表象进行的思维活动叫做形象思维,又称直觉思维。

表象是回想起过去感知过事物形象的过程。表象与感觉、知觉都是对事物外部形象的反映,但两者不同的是:感知觉是对当前事物的直接反映,是由事物直接作用于感觉器官引起的,是认识事物的初级阶段;表象不是对当前事物的直接反映,而是对过去感知过的形象的再现。表象过程具有生动具体的形象,但表象过程不如知觉过程鲜明、完整和稳定。此外,表象具有间接的特征,它不是当前事物的直观形象,而是通过回想或联想在头脑中呈现的过去感知过的事物的形象。

概括地说,形象思维是在实践活动和感性经验基础上,以观念性形象即表象为形式,借助各种图式语言或符号语言为工具,以在经验中积累起来的形象知识为中介反映事物本质和联系的过程。

(2) 形象思维的规律

转换关联律:在形象思维过程中,人们把事物的表象以及表象过程的信息转化成事物的状态信息,即通过表象反映事物的内在性质、内部变化和关系,必须事先在实践活动中建立起表象信息和状态信息的并联系系统。比如,内科医生通过听诊器捕捉患者心肺活动的声像信息,然后把它转换成患者心肺状态的信息,这种信息转换的基础是医生头脑中建立了心肺声像和心肺状态信息的并联系系统。

由于形象思维最基本的过程是形象信息与状态信息转换的过程,所以转换并联是形象思维的一条基本定律。

模式补形律:模式补形律是利用观念性的形象模式对事物或事物过程的表象进行整合

补形,从而推出事物的补形或全形的规律。所谓观念性的形象模式,是指事物或事物过程的概括表象,是在长期实践过程中逐渐形成,它是对事物或事物过程的丰富形象特征进行分析、选择、概括、定型的结果,是形象思维中进行模式补形的内在根据。所谓整合补形是对事物不完整的、片面的表象进行加工、整理,同时补出缺少部分形象或补出事物完整形象的过程,它是一种形象思维的推理形式。

模式补形最主要的环节是建立事物的表象模式。在工程设计中,工程师把物体的形象抽象出来加以规范,采用简捷的线条表现出来,从而为施工人员提供了一个表象模式;在科学研究中,科学工作者对所研究的对象进行系统的研究,科学地确定每种对象的形象特征,于是就形成对象的表象模式。通过表象模式对事物不完整的形象进行整合补形是人类特有的一种形象思维能力,模式补形律是形象思维的一个普遍规律。

(3) 形象思维的主要形式

形象思维的过程主要表现为类比、联想和想象。

类比是通过两个不同对象进行比较的方法进行推理,而重要的一环就是要找到合适的类比对象,这就要运用想象。类比方法在维纳控制论的形成和创立过程中起到关键的作用,正是采用类比沟通了机器、生命体和社会等性质不同的系统,找到了它们的相似性,为功能模拟方法的运用提供了逻辑基础。

联想是一种把工程技术领域里的某个现象与其他领域里的事物联系起来加以思考的方法。联想能够克服两个概念在意义上的差距把它们联系起来,联想的生理和心理机制是暂时的神经联系,也就是神经元模型之间的暂时联想。纳维就是利用类比和联想的方法,考究反馈在各种不同系统(从人的神经系统到技术领域)的表现,为控制论的形成奠定了基础。

想象是对头脑中已有的表象进行加工改造而创造新形象的思维过程。因此,它可以说是一种创造性的形象思维。想象不是直接感知过的事物的简单再现,而是对已有的表象进行加工改组形成新形象的过程。任何想象都必须以表象为基础,想象与表象既有区别又有联系,表象是现成的、旧有的,而想象是创造新形象的过程。想象的形成过程主要是对表象进行分析综合的加工改组过程,想象的分析和综合是凭借形象来实现的。

想象对新知识的探索和科学发现具有重要作用,爱因斯坦曾说:“想象力比知识更重要,因为知识是有限的,而想象力概括着世界上的一切,推动着进步,并且是知识进化的源泉。严格地说,想象力是科学研究中的实在因素。”

著名的科学家钱学森指出:“人认识客观世界首先是用形象思维,而不是用抽象思维。就是说,人类思维的发展是从具体到抽象。”他建议把形象思维作为思维科学的突破口。因为它一旦搞清楚之后,就把前科学的那一部分,别人很难学到的那些科学以前的知识,即精神财富,都可以挖掘出来,这将把我们的智力开发大大地向前推进一步。

3. 灵感(顿悟)思维学

灵感思维是指人们在研究过程中对于曾经长期反复进行过探索而尚未解决的问题,因某种偶然因素的激发而豁然开朗,使其得到突然性顿悟的思维活动。灵感思维与直觉思维有某些相似之处,它们最主要的特点是产生突发性或偶然性。既突如其来,又稍纵即逝。在科学研究中,“灵机一动,计上心来”,也是这种灵感思维的表述。

灵感与机遇都同属一种偶然性,但二者性质又不相同,机遇发生在观察和实验中,属于客观现象,而灵感却产生于思考问题的过程中,属于主观现象。在科学史上,因偶然因素而

产生灵感的事例是不胜枚举的。

钱学森指出：“如果逻辑思维是线性的，形象思维是二维的，那么灵感思维好像是三维的”，“研究人类的潜意识活动是搞清灵感思维机理的起步方向”。物质世界是一个三维的立体系统，物质世界的最高产物——人脑也是一个三维的立体系统，人脑不仅在意识这个呈现层次上反映立体的客观世界，而且在潜意识这个层次上反映立体的客观世界。潜意识(unconscious)是一个外来语，也译为无意识或下意识。所谓潜意识就是未呈现的意识，是人脑所具备的潜在的反映形式。潜意识的反映既不是人脑中固有的，也不是没有客观来源的，而是大脑这种特别复杂的物质机能，它是以一定的客体为对象的。现代实验心理学通过对脑阈下的各种不同的潜意识信息的电反应(诱发电位)的测定表明，它是客观存在着的。

灵感是人脑中显意识与潜意识交互作用而相互通融的结晶。然而，灵感思维的发生也有一个过程，在潜意识萌发酝酿灵感时，除潜意识推论外，还常有显意识功能的通力合作，当酝酿成熟时，突然与显意识沟通而涌现出来成为灵感思维。所谓潜意识推论是一种特殊的非逻辑性认识活动，它是多因素、多层次、多功能的系统整合过程。灵感思维实际上是一种潜意识思维方式，即是一种非逻辑思维，它同抽象思维、形象思维一样，都是人们理性认识所具备的一种高级认识方式。

灵感思维的基本特征是它的突发性、偶然性、独创性和模糊性，这些特征是它区别于其他思维形式的显著标志。

1.2 思维的神经基础

1.2.1 思维与智能

“人是万物之灵”，人类受到如此高度赞誉是当之无愧的。人们发明了望远镜、无线电、雷达、电话、电视等，有了自己的“千里眼”和“顺风耳”；人们可以驾驶航天飞机去“大闹天宫”。由此可见，人类的智慧和才能是任何其他动物无法比拟的。人何以有这样高超的技能和本领呢？最根本的原因就是人类有其他动物所不具有的发达的大脑。大脑是一切智慧行为的物质基础，没有高度发达的大脑，就不会有人类的智慧和才能，自然更谈不上发明与创造。所以，人类的本质特征就在于具有能够高度发展的智能。

一般说来，智能是指人类所特有的智慧和才能的综合。智慧是指辨析判断、发明创造的能力，才能是指知识和能力。知识是指人们在改造世界的实践中所获得的认识和经验的总和。能力可以理解为能胜任某项任务的主观条件。智力是智能的近义词，是指人认识、理解客观事物并运用知识、经验等解决问题的能力，包括观察、记忆、思维、想象、联想、判断、推理、决策等能力。所以，智能是人类所特有的智慧和能力的综合。概括说来，人类的智能就是人类认识世界和改造世界(包括自己在内)的才智(即才能和智慧)和本领。

人类智能的特点主要是思想，而思想的核心又是思维。可以说，没有思维就没有人类的智能，正是因为有了思维，人类的智能才得以远远超出动物而产生了质的飞跃，出现了思想、意识，才使人类成为万物之灵。

1.2.2 思维的神经基础

人所以能够感知和理解客观事物，作出反应，形成复杂的智能活动，是因为人具有产生

这些心理活动的物质基础,那就是人类具有特殊的智能器官,主要是指高度发达的大脑,以及感觉器官、动作器官和语言器官。而在这些智能器官中最重要的是作为思维器官的大脑,它是人类产生智能并发展智能的物质基础。

19 世纪末 20 世纪初自然科学开始研究人脑思维的生理机制。谢切诺夫(И. М. Сеченов, 1829~1905)的神经生理学和巴甫洛夫(Н. П. Павлов, 1849~1936)的高级神经活动学说,揭示了人们的思维活动和大脑物质活动的生理过程的内在联系,证明大脑是人的思维器官,是人的智能活动的物质基础。

从 20 世纪中叶开始,一些心理学家、分子生物学家和人工智能专家,在神经生理学、高级神经活动学说的基础上,利用电子技术成果,从结构和功能方面进一步研究人脑的智能活动。研究结果表明,人的大脑由两半球组成,这两半球又由胼胝体联系起来。两半球的功能是有差异的,而两半球的功能由胼胝体加以协调。1981 年美国著名神经生理学家诺贝尔奖金获得者斯佩里(R. W. Sperry, 1913~)通过对裂脑人的精细实验证明,人脑的左半球主要同抽象思维、象征性关系和对象的细节的逻辑分析有关。它的主要功能是逻辑分析,体现了人的认识及有意识的行为,主要表现为顺序的、分析的、语言的、局部的、线性的等特点;右半球与知觉、直觉和空间有关,具有形象思维的功能,具有音乐、绘画、综合、整体和几何-空间的鉴别能力,主要表现为并行的、综合的、视觉空间的、非词语的、总体的、立体的等特点。

人类的高级行为首先应基于知觉,然后才能通过理性分析取得结果,这样的思维过程首先是由大脑左半球进行逻辑思维,然后通过右半球进行形象思维,再通过胼胝体联系并加以协调两半球的思维活动。在正常情况下,两半球之间存在着极为密切的联系,因而形象思维与抽象思维这两种思维方式不是截然分开的,而是互相交织、互相补充和互相转化的,从而达到对客观世界的更完美、更本质的认识。

灵感思维的神经基础是什么?近来,科学家们的最新研究成果表明,灵感的秘密在脑电波上。人在觉醒状态下进行思维活动时,大脑中有两种脑波,一种叫 α 波,一种称作 β 波。 α 波是有规则的调和振动,表明精神集中,大脑中有许多神经回路投入协调一致的工作。与此相反, β 波是不规则不调和的振动,表示大脑的活动分散,精神不集中。科学家们认为,当灵感出现时,脑电波中 α 波就占优势。此时大脑中的潜意识大门打开,大脑思维可以抓住潜意识中所储存的主观信息,使其上升到意识中来,这就产生了智慧火花一闪间的悟性——灵感。

1.3 智能模拟基础

人工智能是 20 世纪中期产生的并正在迅速发展的新兴边缘学科。它是探索和模拟人的智能和思维过程的规律,并进而设计出类似人的某些智能自动机的科学。人工智能的创始人温斯顿(P. H. Winston)认为人工智能的中心任务是研究如何使计算机去做那些过去只有靠人的智力才能做的工作。

本节主要从智能控制的角度,介绍智能模拟的科学基础、哲学基础、基本途径等问题。

1.3.1 智能模拟的科学基础

为了使机器具有某种人的智能,就必须研究生物机体的控制系统和人的思维活动规律

与生理机制。从维纳创立的控制论,到工程控制论、经济控制论、生物控制论,再发展到智能控制论,这表明控制论这门科学随着科学技术发展及社会进步,它研究对象的领域不断的扩大,同时控制系统本身的控制决策的智能水平也在不断地提高。当今的科学技术比起维纳创立控制论的40年代,已经取得了长足的进步,这就为进行智能模拟创造了良好的条件。但是,应该看到,人脑的思维活动极其复杂,模拟人脑思维活动是一项系统工程,它需要众多学科通力合作、多途径攻关,才能使得人工智能的水平逐渐向人的智能水平接近。

神经生理学揭示了,大脑是在长期实践活动中形成的高度组织起来的中枢神经系统,它是思维的物质基础。控制论和系统论运用系统的方法,从功能上揭示了机器和生物有机体不同系统所具有的共同规律,从而为人们从功能上模拟人的思维活动奠定了理论基础。计算机科学的发展,尤其是智能计算机的研制为智能模拟提供了理论和技术手段。思维科学的基础研究为智能模拟揭示了思维的规律和方法。模糊数学的创立和发展为模拟人的模糊逻辑思维方式提供了工具。人工神经网络理论研究为从结构和功能上模拟人的智能提供了重要手段。

随着科学技术的迅猛发展,新的学科会不断产生,由于智能模拟的需要,许多新兴学科又会高度地综合,其结果必将把智能模拟推向更高的水平。

1.3.2 智能模拟的哲学基础

众所周知,世界的统一性在于它的物质性,世界上除了运动的物质,除了千差万别的物质形态之外,再没有别的东西了。大脑的出现,是生物长期进化的产物。人脑是在社会实践的基础上产生和发展起来的高度复杂的物质体系,是思维的器官,而思维是人类智能的核心,是人脑的机能和属性。因此,从理论上讲,可以用物质的运动来模拟人脑的思维活动。

世界上永恒运动着发展着的物质是由运动形式决定的,物质的多样性和运动的多样性是紧密联系着的。物质的各种运动形式不仅可以互相转化,而且还存在着一种包含关系,即高级运动形式包含着低级运动形式,复杂的运动形式包含着简单的运动形式。这种包含关系反映了多种运动形式从低级到高级的发展变化规律。人的思维活动是自然界发展到社会运动形式的产物,是一种高级运动形式,同样也包含着一系列的低级运动形式。因此,人们可以借助计算机及其必要的可以实现的各种运动形式,来模拟人的思维活动。

由于思维与物质在本原上是统一的,在规则上是一致的,在运动形式上是包含的。因此,可以用其他形式的物质运动来模拟人的思维活动,这就是智能之所以能够模拟的哲学基础。

应该指出,人工智能的根本目的是用物化的智能延伸和扩展人脑和机体的某些功能,智能模拟的根本方法是功能模拟法,模拟和被模拟的两个系统在结构和在实际过程中允许不一样,而且也没有必要要求一样。所以,模拟是仿真,而不是原型,模拟是近似,而不是等同,在这个意义上讲,模拟智能就是仿人智能。

1.3.3 智能模拟的基本途径

自古以来,人们一直试图用各种机器来代替人的部分脑力劳动,以提高人类征服自然改造自然的能力。从20世纪50年代起,世界上许多控制论专家、计算机科学家、心理学家、仿生学家等分别从不同角度探讨智能模拟问题,概括起来主要有以下三种途径: