

先进控制理论： 智能控制方法及应用研究

刘海朝 宋小娜 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

先进控制理论： 智能控制方法及应用研究

刘海朝 宋小娜 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

智能控制理论是继经典控制理论和现代控制理论之后出现的一个先进控制理论。本书着重反映智能理论和方法解决复杂系统控制问题的方法意义,同时介绍智能理论与方法在控制系统中的各种应用实例,并力求反映国内外智能控制研究和应用的最新进展。本书主要内容涵盖了智能控制系统的结构与仿真、基于模糊推理的智能控制系统、基于神经网络的智能控制系统等。

本书结构合理,条理清晰,内容丰富新颖,可供从事智能控制研究与应用的科技工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

先进控制理论:智能控制方法及应用研究/刘海朝,
宋小娜著. —北京:中国水利水电出版社,2019.3

ISBN 978-7-5170-7547-9

I. ①先… II. ①刘… ②宋… III. ①智能控制
IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 056784 号

书 名	先进控制理论:智能控制方法及应用研究 XIANJIN KONGZHI LILUN: ZHINENG KONGZHI FANGFA JI YINGYONG YANJIU
作 者	刘海朝 宋小娜 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:sales@waterpub.com.cn 电话:(010)68367658(营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京亚吉飞数码科技有限公司
印 刷	三河市华晨印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16 开本 15.75 印张 282 千字
版 次	2019 年 5 月第 1 版 2019 年 5 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	72.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

智能控制对许多人来说,既熟悉又陌生。熟悉是因为“智能”是当前非常流行的词汇,陌生则是因为即使从事控制的专业人员也未必对智能控制的内涵理解得很深刻。智能控制系统、理论及应用是继自动控制原理和现代控制工程之后兴起的先进控制理论及技术。人工神经网络和模糊逻辑系统是智能控制系统发展、研究和应用的关键理论与技术内容。

随着计算机技术的飞速发展和性能的不断提高,使得用机器模拟人的智能决策行为对复杂对象进行控制变得易于实现,这样的控制形式被称为智能控制。因此,智能控制是借助于计算机模拟人(包括操作人员及控制专家)对难以建立精确数学模型的复杂对象的智能控制决策行为,基于控制系统的输入输出数据的因果关系推理,实现对复杂对象计算机闭环数字控制的形式。

在最近的十几年中,人们已经看到模糊逻辑和神经网络以各自的优势进行相互渗透,所形成的模糊神经网络在各种优化技术的配合下,其应用在数量和种类上都得到迅速增长,其范围涉及各行各业。模糊神经网络在智能控制系统的概念和设计中不断产生重要影响。

目前,智能控制技术已发展进入实用化和工程化的阶段,智能控制技术已成为自动化工程技术人员必须掌握的专业知识与技术手段。全书分9章对智能控制的基本概念、基本原理及实现方法进行了提炼,力求使内容少而精,内容涉及智能控制综述、智能控制系统的结构与仿真、基于模糊推理的智能控制系统、基于神经网络的智能控制系统、专家控制技术、其他智能控制方法、智能控制的集成技术、智能控制的优化算法、智能控制的应用实例,并分析了许多智能控制系统的设计实现方法及应用实例。既具有一定的学术价值,又具有一定的实用价值。

近几年,群体智能也应用到了系统辨识中,改变了经典辨识中的最小二乘法,减少了对激励信号的限制,改变了最小二乘算法中单一的离散模型,大大推动了系统辨识的工程应用。神经网络在系统建模和故障诊断中得到了实际应用。由于神经网络可以模拟任何非线性函数,因此,有许多不能用参数模型描述的非线性系统现改为用神经网络描述。但是,神经网络需要

迭代计算,也因此大大限制了神经网络的实时应用。专家系统发展得较早,但发展得很缓慢。原因是,至今人们还不能对人脑的思维有清楚的认识。特别是人们常说的“第六感”“潜意识”等还不能被模拟。因此,专家系统的实际应用是有限的。

在撰写本书的过程中,作者得到了同行业内许多专家学者的指导帮助,也参考了国内外大量的学术文献,在此一并表示真诚的感谢。作者水平有限,加之智能控制是当今最热门的学科之一,各种新理论、新技术、新方法不断涌现,已有理论也在不断更新,书中难免有疏漏和不足之处,真诚希望有关专家和读者批评指正。

作 者

2018 年 10 月

目 录

前言

第 1 章 智能控制综述	1
1.1 智能控制问题的提出及产生	1
1.2 智能控制的概念和技术特点	4
1.3 智能控制的几个重要分支	5
1.4 智能控制技术的实现	6
1.5 智能控制的应用现状及发展趋势	9
第 2 章 智能控制系统的结构与仿真	13
2.1 智能控制系统的基本结构	13
2.2 智能控制系统的分类	16
2.3 递阶智能控制系统的结构和理论	21
2.4 智能控制系统的信息结构理论	28
2.5 数字仿真程序结构	38
第 3 章 基于模糊推理的智能控制系统	43
3.1 模糊控制系统概述	43
3.2 模糊控制的数学基础	44
3.3 模糊逻辑推理	50
3.4 模糊建模	54
3.5 模糊逻辑控制器的结构与设计	66
3.6 带自调整因子的模糊控制器的设计	69
3.7 模糊控制系统的稳定性分析	76
3.8 基于模糊补偿的机械手自适应模糊控制	81
第 4 章 基于神经网络的智能控制系统	87
4.1 神经网络的模型及连接方式	87
4.2 前馈神经网络	92
4.3 Hopfield 神经网络	97
4.4 神经网络控制	100
4.5 神经网络控制非线性动态系统的能控性与稳定性	103

第 5 章 专家控制技术	110
5.1 专家系统	110
5.2 专家控制	113
5.3 专家 PID 控制及仿真实例	127
第 6 章 其他智能控制方法	131
6.1 仿人智能控制	131
6.2 学习控制系统	137
6.3 递阶智能控制	145
第 7 章 智能控制的集成技术	153
7.1 模糊神经网络控制	153
7.2 专家模糊控制系统	155
7.3 基于神经网络的自适应控制	160
7.4 自学习模糊神经控制系统	165
第 8 章 智能控制的优化算法	169
8.1 基于遗传算法的智能控制	169
8.2 基于集群智能的智能控制	175
第 9 章 智能控制的应用实例	201
9.1 机器人智能控制系统	201
9.2 递阶智能控制在汽车自动驾驶系统中的应用	215
9.3 地铁机车的模糊控制	219
9.4 基于模糊控制的自动泊车控制系统	224
9.5 汽车故障诊断专家系统	232
9.6 基于模糊神经网络控制的汽车主动悬架系统	235
参考文献	238

第 1 章 智能控制综述

随着被控对象的复杂化,越来越难以用精确的数学模型来描述高度的非线性、强噪声干扰、复杂的信息结构、分散的传感元件与执行元件、分层和分散的决策机构以及动态突变性等。另外,控制过程中的诸多不确定性也难以应用精确的数学模型来描述。面对这些复杂对象的控制问题,人们开创性地将人工智能应用到了控制理论之中,发展出了智能控制理论。该理论是对计算机科学、人工智能、知识工程、模式识别、系统论、信息论、控制论、模糊集合论、人工神经网络、进化论等诸多科学技术与方法的高度集成,对于解决复杂系统的控制问题具有十分重要意义,是控制理论发展的重要方向之一。

1.1 智能控制问题的提出及产生

1.1.1 智能控制问题的提出

自从 1932 年奈奎斯特(H. Nyquist)发表反馈放大器的稳定性论文以来,控制理论学科的发展已走过 80 多年的历程,其中 20 世纪 40 年代中到 50 年代末是经典控制理论的成熟和发展阶段,20 世纪 60 年代到 70 年代是现代控制理论的形成和发展阶段。50 年代末,经典控制理论已经成熟。进入 60 年代以后,由于数字计算机技术的发展为解决复杂多维系统的控制提供了技术支撑,因此在此期间,以庞特里亚金(Pontryagin)的极大值原理、贝尔曼(Bellman)的动态规划、卡尔曼(Kalman)的线性滤波和估计理论为基石的现代控制理论得到了迅速发展,并形成了以最优控制(二次型最优控制、 H^∞ 控制等)、系统辨识和最优估计、自适应控制等为代表的现代控制理论分析和设计方法。系统分析的对象已转向多输入-多输出线性控制系统。现代控制理论的数学模型主要是状态空间描述法。随着要研究的对象和系统越来越复杂,如智能机器人系统、复杂生物化学过程控制等,仅仅借助于

数学模型描述和分析的传统控制理论已难以解决复杂系统的控制问题,尤其是在具有如下特点的一类现代控制工程中:

(1)不确定性系统。传统的控制理论都是基于数学模型的控制,这里的模型包括控制对象和干扰模型。传统控制通常认为模型是已知的或经过辨识可以得到的,对于不确定性系统,传统控制虽然也有诸如自适应控制和鲁棒控制等,但一般仅限于系统参数在一定范围内缓慢变化的情况,其优化控制的范围是很有限的。

(2)高度非线性系统。传统的控制理论主要是面向线性系统,其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可供使用,但总的来说,非线性控制理论还很不成熟,有些方法又过于复杂,无法得以广泛的应用。

(3)复杂任务的控制要求。现代复杂系统要以各种形式(视觉、听觉等)将周围环境信息作为系统的输入信息,对这些信息的处理和融合,依靠传统控制理论的方法已难以奏效,尤其是对于复杂的控制任务,诸如复杂工业过程控制系统、计算机集成制造系统(CIMS)、航天航空控制系统、社会经济管理系统、环保及能源系统等,传统的控制理论都无能为力。

1.1.2 智能控制的产生

随着控制理论及其相关应用领域的变革,控制对象日趋复杂化,控制目标日趋精准化,传统的数学工具与分析方法逐渐显得力不从心。大量的事实证明,传统的控制理论与方法无法解决被控对象复杂、控制环境多变,而且控制任务繁重的控制系统的控制问题。究其原因,主要包括如下几个方面:

(1)传统的控制理论都是建立在精确的数学模型之上的。在建立精确数学模型过程中,往往进行了一定的简化,导致了某些信息的丢失。在高新科技的推动下,很多复杂系统已经无法使用数学语言来设计和分析,必须用工程技术语言来描述,故而寻求新的描述方法成为一种必然选择。

(2)在应对控制对象的复杂性以及不确定性方面,现代控制理论虽然也具备一定的能力,但这种能力十分有限。例如,自适应控制适合于系统参数在一定范围内的慢变化情况,鲁棒(Robust)控制区域是很有限的。然而对于实际的工业过程控制,其数学模型往往具有十分显著的不确定性,而被控制对象也往往具有非常严重的非线性,同时系统的工作点也往往存在着剧烈的变化。利用自适应和鲁棒控制处理这些复杂的控制问题时,往往存在难以弥补的缺陷,故而寻求新的控制技术和方法就成为了人们的必然选择。

(3)现代复杂系统往往集视觉、听觉、触觉、接近觉等为一体,即将周围环境的图形、文字、声音等信息作为直接输入,并将这些信息融合,进而完成分析和推理。这就要求现代控制系统必须能够适应周围环境和条件的变化,并且相应地做出合适的判断、决策以及行动。面对这些新要求,传统控制理论和方法基本上无能为力,必须采用具有自适应、自学习和自组织功能的新型控制系统,故而研究开发新一代的控制理论和技术是唯一的途径。

人们从改造大自然的过程中,认识到人类具有很强的学习和适应周围环境的能力。人类的直觉和经验具有十分强大的能动性,大量的事实表明,利用人类的直觉和经验往往可以很好地操作一些复杂的系统,并且得到的结果也比较理想。基于此,控制科学家们研究并发展了一种仿人的控制论,智能控制正是由此而萌芽的。当然,仅仅通过模仿人类的直觉和经验完成对复杂系统控制的方法具有一定的局限性,要想对更多、更复杂的系统进行控制,智能控制还必须具备模拟人类思维和方法的能力。

通过上述关于智能控制产生背景的讨论可知,智能控制主要是人们为了更好地解决对复杂控制系统的控制问题而研究并发展起来的,它可以被视作为自动控制的“升级版”。如图 1-1 所示,给出了控制科学的发展过程框架图。

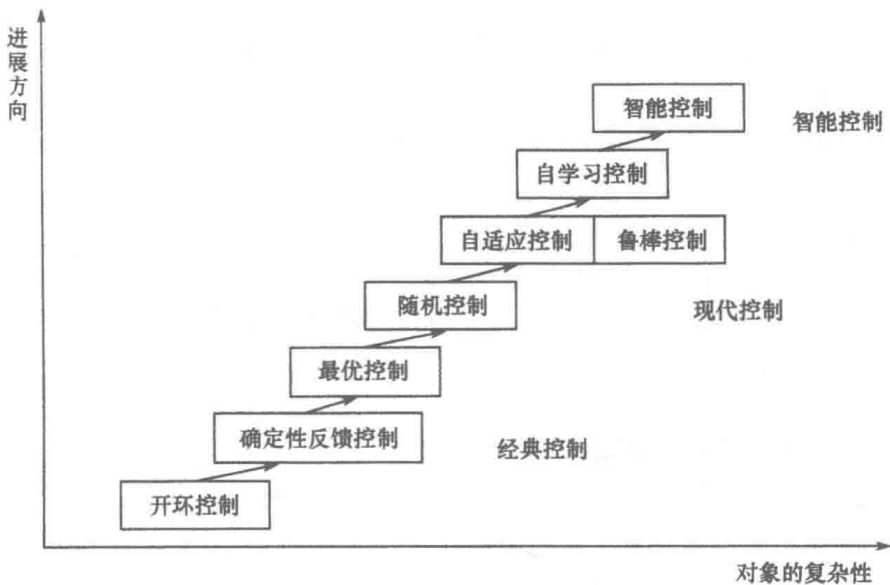


图 1-1 控制科学的发展过程

1.2 智能控制的概念和技术特点

1.2.1 智能控制的定义

智能控制是一门新兴学科,从“智能控制”这个术语于1967年由利昂兹等人提出后,现在还没有统一的定义。IEEE控制系统协会将其总结为“智能控制必须具有模拟人类学习(Learning)和自适应(Adaptation)的能力”。

从控制工程的角度来看,智能控制有其特定的含义,需要有比较确切的定义。

像智能的定义一样,智能控制也可以用不同的观点,做出多种定义。

定性地讲,智能控制系统应具有仿人的功能(学习、推理);能适应不断变化的环境;能处理多种信息以减少不确定性;能以安全和可靠的方式进行规划、产生和执行控制的动作,获取系统总体上最优或次优的性能指标。

相应地,从系统一般行为特性出发,J. S Albus(1986)提出,智能控制是有知识的“行为舵手”,它把知识和反馈结合起来,形成感知-交互式、以目标为导向的控制系统。该系统可以进行规划,产生有效的、有目的的行为,在不确定的环境中,达到既定的目标。

从认知过程看,智能控制是一种计算上有效的过程,它在非完整的指标下,通过最基本的操作,即归纳(G)、集注(FA)和组合搜索(CS),把表达不完善、不确定的复杂系统引向规定的目标。对人造智能机器而言,往往强调机器信息的加工和处理,强调语言方法、数学方法和多种算法的结合。因此,可以定义智能控制为认知科学的研究成果和多种数学编程的控制技术的结合。它把施加于系统的各种算法和数学与语言方法融为一体。

1.2.2 智能控制的技术特点

智能控制的研究重点不在控制对象的数学模型分析,而在于智能控制器模型的建立,包括知识的获取、表示和存储,智能推理方式的设计等。其控制对象和控制性能也与传统控制有很大不同。

(1)无须建立被控对象的数学模型,特别适合非线性对象、时变对象、复杂不确定的控制对象。这些对象正好是传统控制方法难以取得好的自动控制效果的对象。

(2)具有分层递阶的控制组织结构。由于智能控制系统输入信息多,所以模仿了人类智能结构特点,有分层信息处理和决策机构,层次间还有协调。组织结构体现了“智能递增,精度递减”的原理,便于处理大量的信息和存储的知识,并进行推理。

(3)控制效果具有自适应能力、鲁棒性好。智能控制系统不依赖于对象模型,所以根据输入输出变化可以自适应调整控制策略。同时,由于智能的非定量粗略描述性,智能控制系统更能容忍噪声干扰。

(4)具有学习能力,控制能力可以不断增强。智能控制需要借助已有知识,而知识是可以不断学习丰富的。所以智能控制系统具有不断学习、改进控制性能的能力。

1.3 智能控制的几个重要分支

1.3.1 模糊控制

以往的各种传统控制方法均是建立在被控对象精确数学模型的基础上,然而,随着系统复杂程度的提高,将难以建立系统的精确数学模型。

在工程实践中,人们发现,一个复杂的控制系统可由一个操作人员凭着丰富的实践经验得到满意的控制效果。这说明,如果通过模拟人脑的思维方法设计控制器,可实现复杂系统的控制,由此产生了模糊控制。

1.3.2 神经网络控制

将神经网络引入控制领域就形成了神经网络控制。神经网络控制是从机理上对人脑生理系统进行简单结构模拟的一种新兴智能控制方法。神经网络具有并行机制、模式识别、记忆和自学习能力的特点,它能充分逼近任意复杂的非线性系统,能够学习与适应不确定系统的动态特性,有很强的鲁棒性和容错性。神经网络控制在控制领域有着广泛的应用。

1.3.3 智能优化算法

随着优化理论的发展,一些新的智能优化算法得到了迅速发展和广泛应用,成为解决控制系统优化问题的新方法,如遗传算法、蚁群算法、粒子群

算法、差分进化算法等,这些算法丰富了控制系统的设计。这些优化算法都是通过模拟揭示自然现象和过程来实现的,其优点及其机制独特,为非线性控制系统设计问题提供了切实可行的解决方案。

智能优化算法可用于控制系统的优化中,在智能控制领域有广泛的应用。

1.4 智能控制技术的实现

1.4.1 计算机控制技术

智能控制技术在实际控制系统中得以广泛应用,离不开计算机控制技术。智能控制技术实现的核心是计算机的软件算法。

智能控制是以人工智能、控制论为理论基础,并建立了自己的理论体系,但是其技术实现主要靠计算机软件编程来进行智能控制。少量固定算法、追求快速实时的应用中将软件算法采用一些逻辑硬件来实现,但是绝大多数是直接利用计算机编程来实现的。既能实现复杂的逻辑算法,又可以在控制中进行调整、改进算法或应用于各种控制对象,具有灵活性。智能控制系统的典型结构也是一个计算机控制系统的典型结构。其中,智能控制器部分就是按照智能控制算法编写的计算机软件。

无论是模糊控制系统的模糊化、去模糊化、模糊推理、神经网络控制中的神经网络结构设计和网络连接权值的学习或者遗传算法的优化,虽然在理论上有时显得复杂、深奥,使使用者感觉难以掌握,但在进行应用设计时,计算机辅助下的设计实现是比较容易的。各种已相对成熟的智能控制技术,均已有成熟的算法实现,而且可以直接编程调用。可以说,在理解智能控制理论上,借助于计算机辅助是很容易实现智能控制系统的设计的,从而在工程实践中应用智能控制技术。

1.4.2 智能控制系统设计

智能控制系统设计离不开计算机辅助。在学习和实验研究阶段,美国 MathWorks 公司的通用技术计算语言软件 MATLAB 就是很好的智能控制技术应用辅助软件和仿真实验平台。在实际工程应用阶段,一般通过高级语言编程来编程实现,各大公司的控制设备系统往往还带有自己的设计

平台,但是其控制算法、辅助设计方式、仿真实验与 MATLAB 下的设计与实验本质上原理是一致的。通过 MATLAB 下的设计和仿真实验学习后,很容易过渡到掌握使用专用设计软件或使用高级语言来设计实际智能控制系统。

MATLAB 有模糊逻辑、神经网络、遗传算法等多个专用智能控制技术工具箱,包含了大量的相关函数,使用者可以直接调用,也可以进行二次开发,或者编写增加自己的函数。而且 MATLAB 针对智能控制技术应用设计有图形化用户界面,使用更方便。

在图形化用户界面中,用户通过简单的参数设置就可以实现模糊控制系统的设计,并图形化显示所设计系统的效果,包括输入输出关系、模糊推理的各规则推理细节等,便于根据设计效果进行修改。图 1-2 是一个水箱水位控制模糊控制器的输入输出关系曲面。

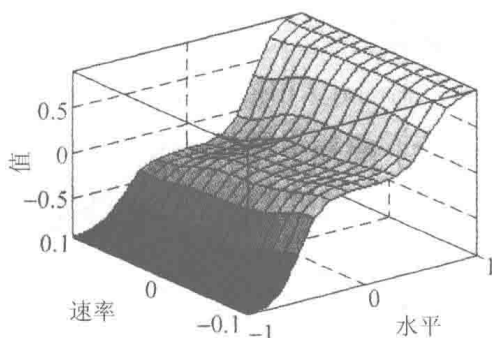


图 1-2 水位控制模糊推理系统输出曲面

图 1-3 是 MATLAB 设计的一个单层神经网络的向量模型。

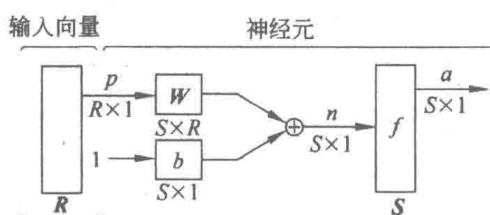


图 1-3 单层神经网络的向量模型

图 1-4 是 MATLAB 神经网络工具箱的神经网络训练函数 trainlm 对某个设计的神经网络进行训练学习的结果曲线,其中“·”表示神经网络的输出结果,+表示函数的实际值。

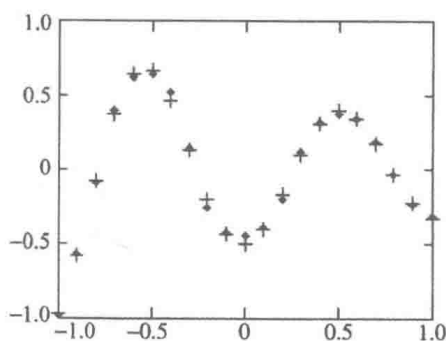


图 1-4 神经网络逼近结果

图 1-5 显示了训练学习中的网络性能改进过程,经过 6 次迭代学习,误差下降最后收敛。

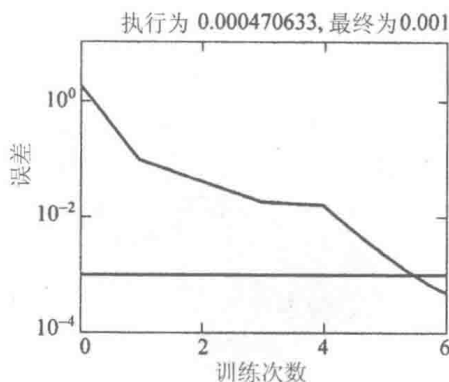


图 1-5 神经网络调试误差曲线

为了有效进行智能控制系统设计和调试,控制系统仿真实验对于系统设计和学习智能控制技术都是很有意义的。MATLAB 带有仿真实验平台 Simulink,可以通过建立被控对象仿真模型和设计的控制器进行仿真实验,也可以直接调用 MATLAB 智能工具箱辅助设计的智能控制器,并图形化显示实验结果,还可以方便地进行定量分析。图 1-6 是在 MATLAB 的 Simulink 中建立的水箱水位模糊控制系统仿真模型,通过模型的运行进行仿真实验可以看到所设计的模糊控制器的控制效果。

在智能控制理论学习的基础上,结合 MATLAB 软件平台进行动手设计和实验,可以使智能控制技术的理论学习与实践相结合。利用 MATLAB 进行智能控制系统设计和仿真实验比较容易掌握。通过这部分内容的讲解,将更好地帮助理解智能控制理论,并掌握智能控制技术的实现,从而进一步在工程实践中分析、设计智能控制系统,将智能控制技术应用用于自动控制实践。

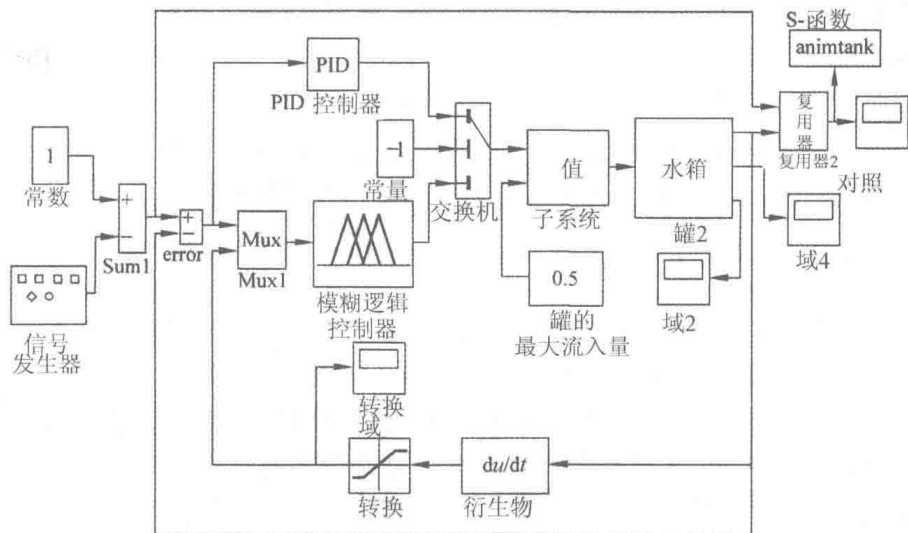


图 1-6 水箱水位模糊控制系统仿真模型

1.5 智能控制的应用现状及发展趋势

1.5.1 智能控制的应用现状

1.5.1.1 在智能汽车领域应用

在控制系统的应用中,汽车使用控制系统技术已经变得十分成熟。在取得控制系统中,由于汽车本身受到很多外界不确定性因素的影响,本身的动态特性会在汽车运行的过程中发生较大的变化,甚至出现失稳状态导致失去控制。汽车复杂而又多自由度的系统要求有更加先进可靠的控制系统。

由于智能控制系统在控制方面较传统的控制系统有较多的优势,因此在汽车制造领域得到认可和重视。同时被广泛地应用在汽车的制造领域中。汽车在制造的过程中会使用很多系统,通常将这些系统进行划分,四个大系统的划分主要有:悬架控制系统、动力传统系统、转向和制动控制系统。这四大系统共同构成了汽车复杂的系统群。

汽车的生产制造过程就是技术不断更新进步的过程。先进的技术会代

替落后的技术。对于汽车的控制系统也是一样,智能控制系统优越于传统的控制系统,可以将汽车的性能进行有效控制。我国是发展中国家,汽车制造业起步较晚,在汽车制造领域的相关技术系统了解的还比较浅,因此在今后汽车制造中还要进一步研究新技术。对于智能控制,由于它是比较先进的技术,因此会伴随汽车制造业的发展不断得到更新改进和完善。

1.5.1.2 在机器人系统中的应用

近些年来,随着人工智能的高速发展,形形色色的智能机器人已经逐步走入了人类的生产和生活之中,在工业生产、物流配送、体育、娱乐、家居及医疗领域也得到了广泛应用。例如,足球机器人、舞蹈机器人、机器宠物和家庭智能机器人等,在将科学技术与实际结合的同时还给人类带来极大的乐趣;智能医疗机器人在辅助外科手术及远程医疗服务方面已获得成功的应用;微型智能机器人在精密机械加工、现代光学仪器、现代生物工程、医学和医疗等应用中将有广阔的应用前景。总之,有关智能机器人的应用数不胜数。在机器人系统中,智能控制的应用不言而喻。

1.5.1.3 在现代制造系统中的应用

制造系统的控制主要分为系统控制和故障诊断两大类。就系统控制而言,一方面,以专家系统的“Then-If”逆向推理功能为核心构建反馈机构,进而可以实现对控制机构或者选择较好的模式或参数的修改;另一方面,综合应用模糊集合(关系)的鲁棒性,以集成融合的技术手段,在闭环控制外环的决策选取机构中加入模糊信息,进而可以实现对控制动作的选择。就故障诊断而言,依托人工神经网络强大的信息处理功能和学习功能,可以实现对系统故障的诊断,例如诊断 CNC 的机械故障等。现代制造系统向智能化发展的趋势,是智能制造的要求。

1.5.1.4 在 CIMS 和 CIPS 中的应用

随着科技与社会的不断发展,工业生产的规模日益大型化,工业生产过程日益复杂化,对计算机系统提出了更高的要求。一方面,计算机不仅要完成面向过程的控制任务,而且还要具有将控制系统优化升级的功能。另一方面,计算机需要将全部生产过程的信息尽可能多地收集起来,并且进行有效的综合与优化,从而更好地服务于生产、调度、管理、经营等。要满足这些要求,传统的计算机系统就有点力不从心了,必须引入人工智能,即实现智能控制。能实现这些功能的系统有许多不同的名称,如全厂监督与控制系统、工厂综合自动化系统、计算机集成制造系统 CIMS 和计算机集成过程控