



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

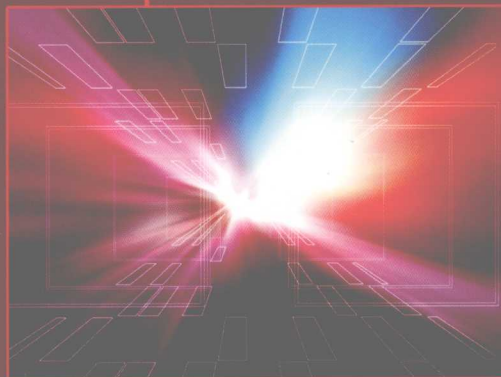
模糊控制器 设计理论与应用

**Fuzzy Controller Design
Theory and Applications**

(克罗地亚) Zdenko Kovačić
Stjepan Bogdan 著

胡玉玲 张立权
刘艳军 陈一民 译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

模糊控制器设计 理论与应用

(克罗地亚) Zdenko Kovačić 著
Stjepan Bogdan

胡玉玲 张立权 刘艳军 陈一民 译



机械工业出版社

本书主要介绍了易于应用到不同类型的工程实际中的模糊控制器设计技术。书中描述了一些模糊控制理论的基本概念和做出成功设计所必备的基础知识。混合、自适应和自学习模糊控制器结构的设计是本书的侧重点,同时还给出了适于离线和在线操作的自适应模糊控制器设计的完整策略。

全书共分7章,内容涵盖从基本的入门水平到面向专业应用水平的模糊控制器设计课题。包括模糊逻辑系统的导论和综述;模糊集合的基本定义及算子;标准模糊控制器设计的要点,并给出了几种易于实现的模糊控制器设计方法;给出了两种自组织模糊控制器;讨论了复杂模糊控制器结构;给出了基于MATLAB/Simulink的模糊控制器设计工程应用范例,并在最后一章专门讨论了模糊控制器的工业应用。

本书适用于从事自动化、自动控制、机械电子和电气自动化领域的工程技术人员及研究生、博士生阅读,也可以作为高等院校自动控制、智能控制等方面的教学参考书。

Fuzzy Controller Design Theory and Applications, ISBN: 978-0-8493-3747-5, by Zdenko Kovačić and Stjepan Bogdan, published by CRC Press, part of Taylor&Francis Group LCC.

Copyright © 2007 by CRC Press.

Authorized translation from the English language edition published by CRC Press, part of Taylor&Francis Group LCC.

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版,未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有,翻印必究。

本书版权登记号:图字01-2007-5497号

图书在版编目(CIP)数据

模糊控制器设计理论与应用/(克罗)科瓦稀奇,(克罗)
波格丹著;胡玉玲等译. —北京:机械工业出版社,2010.1
(国际电气工程先进技术译丛)

Fuzzy Controller Design Theory and Applications

ISBN 978-7-111-29102-2

I. 模… II. ①科…②波…③胡… III. 模糊控制器—设计 IV. TM571.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第212776号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:靳平 责任编辑:任鑫 版式设计:霍永明

封面设计:马精明 责任校对:李婷 责任印制:李妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2010年3月第1版第1次印刷

169mm×239mm·22.5印张·439千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-29102-2

定价:98.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

译 者 序

模糊控制是一种解决复杂非线性系统、难以建立数学模型系统以及不确定内部扰动的多输入多输出系统的控制问题的新方法。在对工业、经济和医药等领域的复杂系统应用之后，模糊控制技术赢得了工程界的广泛认可。

本书作者十多年来一直致力于模糊控制领域的研究。本书给读者提供了不同的模糊控制器设计技术，它们易于应用到各种不同类型的工程实际中。书中没有涵盖所有的模糊逻辑控制理论，而是给出了一些理解概念和做出成功设计所必备的基础知识。混合、自适应和自学习模糊控制器结构的设计是书中的重点。此外，还解释了适于离线和在线操作的自适应模糊控制器设计的策略。希望通过本书建立的范例，可以使读者能够更好地洞悉模糊控制器的设计方法和设计步骤。

全书共分7章，内容涵盖从基本的入门水平到面向专业应用水平的模糊控制器设计课题。本书翻译工作是由四位教师通过辛勤而认真的工作完成的。其中第1~2章由张立权博士翻译，第3~4章由刘艳军老师翻译，第5~6章由胡玉玲讲师翻译，第7章由陈一民讲师翻译，最后由胡玉玲统稿。由于时间和水平有限，本书的翻译难免存在错误和不妥之处，欢迎广大读者批评指正，谢谢。

译 者

原 书 前 言

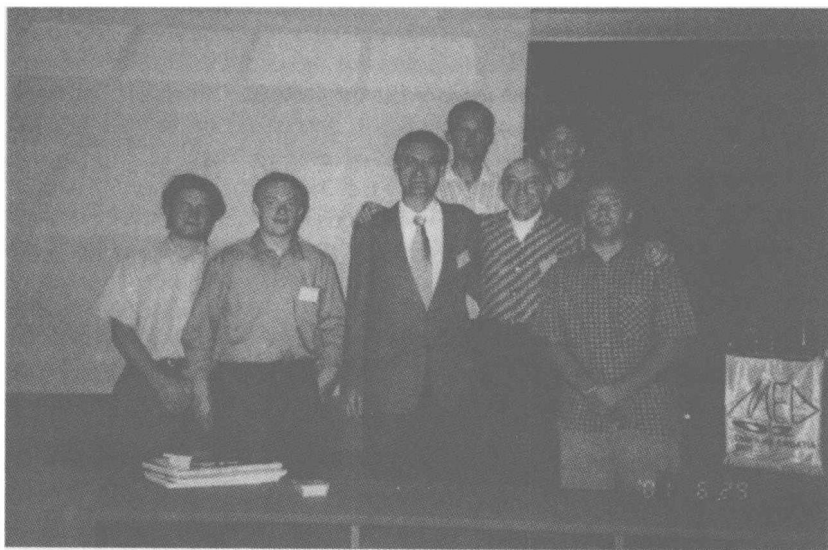
模糊控制是一种新方法，它主要解决复杂非线性系统、难以建立数学模型系统以及不确定内部干扰的多输入多输出系统的控制问题。在对技术性和非技术性系统的大量应用之后，尤其是工业、经济和医药领域的复杂系统，模糊逻辑控制技术得到了工程界的广泛关注。

模糊逻辑和模糊集合理论是人们对实际的控制问题和控制行为深刻理解的结果，使用经典的二值逻辑和传统的自动控制方法不能正确地解释操作员执行的控制行为。“模糊逻辑之父”——美国伯克利加州大学的 Lotfi A. Zadeh 教授在其辉煌的职业生涯伊始就认识到现存的控制理论具有较大的局限性，它无法解决上述几类系统的控制问题。在 20 世纪 60 年代，Zadeh 教授巧妙地摆脱规范思想与解释的束缚，为一个新的系统控制理论的建立奠定了基础。在同模糊控制的反对者长达 20 余年的争辩之后，新理论终于得到了完全的认可，并赢得了一大批追随者。由于大多数反对者来自美国，因此这再一次验证了著名的拉丁格言“在他的国家没有任何一个人是先知”。

Zadeh 教授领导科学研究机构在世界上传播“词计算”思想，已经成为本世纪末最受欢迎的科学家之一。作为一名空中常客，他在克罗地亚停留过两次。在 1968 年，杜布罗夫尼克举办了一次极为重要的科学座谈会，此次会议是第二次世界大战后东西方杰出控制领域科学家的第一次大聚会，Zadeh 教授也出席了此次大会。在 2001 年，杜布罗夫尼克迎来了第九届控制与自动化 MED'01 的地中海会议，本书的作者有幸成为 Zadeh 教授的东道主。在这次会议上，Zadeh 教授做了一篇题为“感知计算：从数计算到词计算——思维的变迁”的主题报告。与 Zadeh 教授在一起的那些日子，给我们留下了深刻的印象，那些会议照片至今仍深深地埋藏在我们的记忆中。在和 Zadeh 教授的一次会谈中，他披露了一个非常有趣的细节——在 1968 年的杜布罗夫尼克科学座谈会，是他第一次在美国之外发表模糊逻辑的演讲。

本书的作者十多年来一直致力于模糊控制领域的研究。虽然和当地工业有着密切的交往，并且努力尝试提高模糊控制技术的影响力，但是我们发现这种技术还没有达到被欣然接受的程度，这缘于模糊控制器设计的启发式特征。也就是复杂的非线性控制问题通常与重大的工程应用有关，项目经理要求必须保证模糊控制系统的稳定性和功能性，这一点有时难以做到。但是，我们相信通过开发足够简单的、容易实现的、尤其是有效的模糊控制器设计技术，就能够弥补模糊控制

理论和实践之间的差距。本书的目的是给读者提供易于应用到各种不同类型的工程实际中的不同的模糊控制器设计技术。本书不打算涵盖所有的模糊逻辑控制理论，而只是描述一些易理解的概念和做出成功设计所必备的基础知识。混合、自适应和自学习模糊控制结构的设计是本书的重点。书中解释了适于离线和在线操作的自适应模糊控制器设计的策略。特别地，我们旨在建立范例，以便使读者能够更好地洞悉设计方法和设计步骤。



在 2001 年的杜布罗夫尼克第 9 届控制与自动化地中海会议上，
Lotfi A. Zadeh 教授和本书的作者及其学生

本书的组织结构

全书共分 7 章，内容涵盖较宽范围的模糊控制器设计课题——从基本的入门水平到面向专业应用水平。

第 1 章是模糊逻辑系统的导论和综述。

第 2 章介绍模糊集合的基本定义及算子。首先解释语言变量、模糊规则、模糊蕴涵及推理机的含义，然后重点描述最常用的模糊控制器结构——双输入-单输出 (DISO) 模糊控制器。本章也探讨了模糊控制系统稳定性这个重要问题。模糊控制器设计的启发式特征给闭环系统的稳定性评价带来了困难。在第 2 章中，介绍了一些基于著名的李亚普诺夫稳定性理论设计模糊控制器的方法。本章给出了一种模糊控制器设计方法，它适合于那些能用二阶过程模型来逼近的系统。在研究系统稳定性时，本章也介绍了一种利用状态空间的几何特性设计模糊控制器

的方法。在状态空间简化成相平面的特殊情况(即二阶系统情况)下,论述了这种方法的实际价值。此外,利用模糊数和模糊算法,本章介绍了一种基于模糊李亚普诺夫稳定性准则的概念设计模糊控制器的方法。在本章中,列举范例的目的是要帮助读者更好地理解每一种设计策略。

第3章讨论标准模糊控制器设计的主要缺点——它的启发式特征。这种特征使模糊控制器的调节变得极其缓慢和消耗时间,即使采用专门的开发工具也难以改变这种不利的状况。为了克服这一问题,本章介绍了几种易于实现的模糊控制器设计方法,这些方法与著名的控制理论及现存的控制器的综合息息相关:如PID控制算法的模糊仿真、基于模型参考的设计以及使用相平面轨迹的设计。为了更好地评价这些方法,本章将把它们用于实验室的控制过程,并给出了有用的实验结果。这些方法可用于非线性本质稳定时变SISO(单输入单输出)高阶系统的模糊控制器的自动初始化设置。在选定的操作点上,非线性系统可线性化。在过程工业中,时常能够找到这种系统(如温度、压力、流量、液位、角速度和位置控制)的实例。

许多实际的控制系统是非线性的,而且一般运行在连续过程参数变化、操作模式改变和存在外部扰动的条件下。对于常规控制器而言,控制质量通常难以维持在期望水平。第4章讨论使用复杂模糊控制器结构的可能性,例如混合或自适应控制结构。对于上述影响,这种控制结构能使控制质量几乎不发生变化。本章介绍一种混合模糊控制器,除模糊控制器之外,它还包含来自经典控制实践的其他控制元件。一般来说,对于过程参数的变化,混合模糊控制器比标准模糊控制器具有更高的鲁棒性。当参数极度变化,甚至混合模糊控制器也不能处理时,可使用自适应模糊控制结构来解决这一问题。本章给出了几种自适应控制设计的方法,其中,模糊模型参考自适应控制(FMRAC)的设计是重点。在最初提出的自适应控制概念中,自适应并不是面向模糊控制器本身,而是面向与模糊控制器相串联的超前-滞后补偿器的参数。本章使用设计范例详细解释和说明了基于积分准则和敏感度模型的超前-滞后补偿器参数的自适应。在本章中,也介绍了FMRAC算法的设计。这种算法具有较高的自适应速度,在稳态期间不产生振荡,并且自适应信号可直接加到反馈控制器的输入端或调节反馈控制器的输出值。对于实际的模糊控制器,由于其输入输出受限,因此工作范围也是受限的。本章也给出了一种基于多模糊规则表的自适应技术,使用这种技术可以扩大模糊控制器的工作范围。通过研读FMRAC接触力控制和角速度控制的实例,读者能够深刻地理解模糊自适应控制方法。

利用模糊逆模型和通常所说的模糊自适应机构的自适应控制策略是启发式的,原因在于它们要求使用者积极参与模糊控制器参数的设置。一种替代的方法是使用稳定且快速收敛的自组织(自学习、自调整)策略自动在线设置模糊控制器

的参数。经典的自调整策略与自学习策略之间的区别在于：前者取决于过程模型，而后者恰恰相反。在第5章中，介绍了几种基于模型参考的自学习方案，它们既有共性又有个性：第一种方案是基于直接李亚普诺夫方法的；第二种方案是具有利用二阶参考模型及模型跟踪误差多项式的学习机制的；第三种方案是基于二阶参考模型和敏感度模型的，这两种模型能够把系统输出的变化与模糊控制器参数的变化联系起来。利用直接李亚普诺夫方法，评价了首个自组织模糊控制系统的稳定性。对于选定的李亚普诺夫函数，获得的稳定条件可用来确定学习系数值。假设使用者能够预见过程增益变化的最大范围，那么根据经典的霍尔维数稳定准则，基于学习算法，就可以对模糊规则表的自组织性进行综合。这种学习算法利用了具有位置、速度和加速度分量的三度模型跟踪误差多项式。在系统的每次运行中，基于模型参考和敏感度模型的学习算法都曾使模糊控制器的参数矢量发生改变。学习算法背后的原因是当一个特定的模糊控制器参数对系统的响应影响最大时，就应该改变它。本章还介绍了如何得到 DISO(双输入单输出)模糊控制器的敏感度模型，以及如何使用二阶参考模型来替代学习算法中的未知控制过程。一些非线性伺服系统的实例论证了自学习模糊控制方法的有效性。利用自适应模糊控制器的自组织性，本章再次介绍了多模糊规则表的自适应技术，并将其应用于一个选定的位置伺服系统。在第5章的结尾部分，给出一种自学习 PD 型模糊控制器。由于存在并行添加的自学习积分项，因此这种控制结构能够补偿由外部扰动所引起的稳态误差。另外，也说明了如何组织积分增益系数的独立学习以及得到了何种实验结果。

MATLAB 和 Simulink 是最受欢迎的仿真软件包之一。为了使读者能够测试本书介绍的一些模糊控制器，在第6章中提供了几个模糊控制系统的范例。这包括第4章介绍的混合模糊控制器，以及第5章给出的两种自组织模糊控制器——基于模型跟踪误差多项式和基于敏感度模型的模糊控制器。自组织模糊控制器被创建为 CMEX S 函数 PSLFLC 和 SLFLC，它们包含在各自的 MATLAB 超模块中。一些与 MATLAB 实际示例相关的范例给出了所考虑的模糊控制算法的效果。最后，以一个基于 MATLAB 的模糊控制器设计工程的例子——电液伺服系统的仿真模型结束第6章。这个工程极为复杂，它必须处理过程非线性参数和时变过程参数。为了简化读者的工作，这里将给出一些指导和有用的建议。

为了说明每章中所介绍方法的实际效果，本书讨论了一些应用，但是第7章仍将专门讨论工业应用，特别针对工业应用中不同的模糊控制器实现技术和不同的实现平台。本章并非罗列众多的应用，这也是一个不可能的任务，而是要着重于一般的模糊控制器实现方案，这将有助于读者设计和实现自己的模糊控制器。在介绍数字模糊控制器在一些常用平台上实现的同时，如微机、可编程序控制器和工业 PC，本章也将更详细地叙述一些选定的应用，以此来说明模糊控制方案

的多功能性——从公路隧道通风系统到外科手术的麻醉控制。

每章的后面均附有一个与本章主题相关的参考文献，为便于查找主题，本书的最后附有索引。

许多人对本书做出了大量的贡献。我们感谢那些学生，在他们的专题项目或攻读硕士论文期间所做的一些 MATLAB 仿真和实际实验，特别是 Mario Balenović、Tomislav Reichenbach、Krešimir Petrincec、Mario Punčec 和 Bruno Birgmajer 几位博士。在基于工业 PLC 的自适应模糊凝汽水位控制器的实现期间，技术支持工作应归功于克罗地亚 Jertovec 热电厂的经理 Dubravko Lukačević。我们也特别感谢德国罗斯托克大学的 Olaf Simanski 博士对本书有价值的贡献，他给出了一个麻醉控制系统的例子，该系统利用模糊控制来控制外科手术患者的催眠深度。

我们要感谢美国阿灵顿郡德克萨斯大学的 Frank L. Lewis 教授，是他最初支持我们构思这本书。我们也要感谢 Robert E. King 教授，是他对本书著作期间的内容、风格以及一些其他重要的事项给出了开放和睿智的评论。

最后，我们要感谢我们亲爱的家人，特别是我们的妻子 Dubravka 和 Jasenka，正是由于她们不断地支持和鼓励，才促使我们完成这一著作。

作者简介

Zdenko Kovačić 分别于 1981 年、1987 年和 1993 年在克罗地亚萨格勒布大学获得电子工程学士、硕士和博士学位。现为萨格勒布大学电子工程和计算机学院控制与计算机工程系的副教授，主任。主要研究领域包括机器人技术、柔性制造系统、智能控制、自适应控制、最优控制和人工智能控制。1990 ~ 1991 年曾在美国弗吉尼亚工学院和州立大学的 Krishnan Ramu 教授的运动控制实验室从事研究工作。曾主持和参加过多项国际，以及克罗地亚政府资助的研究开发项目并成为克罗地亚工业合作伙伴。他曾合作出版著作《机器人基础》(在克罗地亚)，并在书籍、杂志及国内外会议上合著或独著发表众多论文。同时他也是 IEEE 和 KoREMA(克罗地亚通信、计算机、电子、测量和控制学会)的会员，克罗地亚机器人协会的奠基人和副会长。

Stjepan Bogdan 分别于 1990 年、1993 年和 1999 年在克罗地亚萨格勒布大学获得电子工程学士、硕士和博士学位。现为萨格勒布大学电子工程和计算机学院的助理教授。主要研究领域包括机器人技术、柔性制造系统(FMS)、离散事件系统、智能控制、自适应控制、时间最优控制和电气传动控制。1996 ~ 1997 年获得 Fulbright 奖学金，曾在美国德克萨斯大学的 Frank L. Lewis 教授的自动化和机器人研究所从事研究工作。曾主持和参加过多项工业和政府资助的研究开发项目。他曾合作出版《机器人基础》(在克罗地亚)，并在杂志及国内外会议上合著发表众多论文。他也是 KoREMA、克罗地亚机器人学会、IEEE 和 Sigma Xi 的会员。

目 录

译者序

原书前言

作者简介

第1章 导论	1
参考文献	4
第2章 模糊控制器设计	7
2.1 模糊集合	7
2.2 语言变量	13
2.3 模糊规则	15
2.3.1 模糊蕴涵	18
2.3.2 解模糊	24
2.4 模糊控制器的结构	28
2.4.1 模糊规则表	29
2.4.2 模糊集合的形状、数目及分布的选择	31
2.5 模糊控制器的稳定性	35
参考文献	58
第3章 模糊控制器的初始化设置	61
3.1 PID 控制算法的模糊模拟	62
3.1.1 PID 控制器的模糊模拟	63
3.1.1.1 PID 控制器的模糊模拟——变形 A	64
3.1.1.2 PID 控制器的模糊模拟——变形 B	71
3.1.1.3 PID 控制器的模糊模拟——变形 C	72
3.1.1.4 Sugeno 型模糊 PID 控制器	73
3.2 模型参考模糊控制器的初始化设置	73
3.3 相平面模糊控制器的初始化设置	77
3.4 模糊控制器的初始化设置实例	79
3.4.1 PI 控制器的模拟	80

3.4.2 模型参考的初始化设置	83
3.4.3 相平面的初始化设置	86
参考文献	87
第4章 复杂模糊控制器结构	89
4.1 混合模糊控制	90
4.2 自适应模糊控制	99
4.2.1 直接与间接自适应控制	100
4.2.2 模型参考模糊自适应控制系统	104
4.2.2.1 基于灵敏度模型的自适应	106
4.2.2.2 基于积分准则的自适应	112
4.2.2.3 具有模糊自适应的参考模型自适应控制	120
4.2.3 基于多模糊规则表的自适应	138
4.2.4 模糊 MRAC 接触力控制	140
4.2.5 模糊 MRAC 角速度控制	153
参考文献	162
第5章 自组织模糊控制器	168
5.1 基于直接李亚普诺夫方法的自组织模糊控制	169
5.2 基于霍尔维兹稳定性标准的自组织模糊控制	185
5.3 基于灵敏度函数的自组织模糊控制	202
5.3.1 系统灵敏度的基本概念	202
5.3.2 一种自组织模糊算法的综合	204
5.3.3 基于多模糊规则表的控制例子	248
5.3.4 具有自学习积分环节的自组织模糊控制	254
参考文献	258
第6章 模糊控制器作为 MATLAB 的高级模块	262
6.1 MATLAB 模糊逻辑工具箱的特性	262
6.1.1 FIS 编辑器	262
6.1.2 隶属函数编辑器	263
6.1.3 规则编辑器	263
6.1.4 规则观测器	263
6.1.5 在 FLT 中的解模糊方法	266
6.1.6 FLT 命令	266

XII 模糊控制器设计理论与应用

6.2	MATLAB 的混合模糊控制器高级模块	267
6.3	基于多项式的 PSLFLC MATLAB 高级模块	270
6.4	基于灵敏度模型的 SLFLC 的 MATLAB 高级模块	277
6.5	设计项目: 一个电液伺服系统的模糊控制	286
6.5.1	控制过程的数学模型	286
6.5.2	仿真模型	288
6.5.3	模糊控制器设计说明	290
	参考文献	293
第7章	工业应用的模糊控制器的实施	294
7.1	工业模糊控制器简介	294
7.2	工业模糊逻辑控制器的实施平台	296
7.2.1	基于微机的模糊控制器的实施	297
7.2.2	对冷凝水液位进行基于 PLC 的模糊增益调度控制	300
7.2.2.1	冷凝器模型	301
7.2.2.2	标准冷凝器液位控制	303
7.2.2.3	模糊增益调度冷凝水液位控制	307
7.2.2.4	通过西门子 Simatic S7-216 Step 7 PLC 对 FGS 冷凝水液位 控制进行编程	311
7.2.3	基于 PLC 的自学习模糊控制器实施	316
7.2.3.1	PPSOFC——自组织模糊控制器功能块	317
7.3	在过程控制中的模糊控制器应用实例	324
7.3.1	基于 PC 的公路隧道通风系统的模糊预测控制	324
7.3.1.1	模糊预测控制器的结构	324
7.3.1.2	空气流量的预测	325
7.3.1.3	风机数量的预测	326
7.3.1.4	隧道参数辨识	327
7.3.1.5	模糊控制器	330
7.3.1.6	仿真实验	332
7.3.1.7	基于 FBD 的模糊预测控制器的实施	337
7.3.2	麻醉的模糊控制	337
	参考文献	344

第 1 章 导 论

人类解决特殊问题的能力称为智力。智力随处可见，它既可以寓于思想的符号(精确的和抽象的)表达之中，又可以是对运动、语言、笔迹或图片形式感官刺激的解释能力。经验告诉我们，虽然人类不能够精确地定义输入信息及其产生的结果行为，但是却具有同时处理大量信息并做出有效决策的能力。知识水平和获得的经验对人类行为的成功具有很大的影响。人类的思维和决策机制呈现为一个完美的模型，科学家和工程师们一直试图模仿这种模型，并尝试利用它来解决不同的技术与非技术问题。经过不懈的努力，提出了许多称为人工智能方法的措施。例如，人工视觉与听觉建立在信息的利用与处理上，这些信息来自照相机和传声器，即来自功能上与人的感觉器官(如眼睛和耳朵)相匹配的技术设备。我们也可以把一些算法纳入到人工智能的基本形式之中，它们包含人类思维及解决问题方式的要素，例如人工神经网络、模糊逻辑算法、进化或遗传算法和专家系统。

Zadeh 的模糊集合理论是模糊控制的基础^[1]。模糊控制是一种智能的控制方法，它利用多值模糊逻辑和人工智能要素(简化推理原则)来模仿人的思维及反应^[2]。在这里，“模糊”一词意味着不完全明了或不充分明确的，或是根据描述人的主观想法、估计、甚至直觉而给出的较近似的说明。在日常生活中，许多情况都具有不确定性的、模糊的特点，可以用词语和词句来描述，例如大多数、许多、几个、不完全正确的或者很有可能的，所有这些均可视为“模糊词语”。在另一方面，比如错误的、正确的、可能的、必需的、没有一个或者所有的，这些词语显示出明确的含义。在此上下文中，它们代表“准确的词语”。

起初，许多学者强烈反对模糊逻辑概念。他们认为概率理论能够很好地描述任何含糊的或者不精确的形式，而且还声称模糊逻辑理论对于实际的应用而言毫无潜力可挖。在自动控制领域，强大的反对者认为，传统的控制技术要优于模糊逻辑或者至少在效果上与其相等。在 Zadeh 教授的一次访谈中，他评论到：接受模糊逻辑作为解决技术问题方法，这一过程需要在科学分析和工程设计的基本方法上进行长期的教育和改变^[3]。

目前，许多工程人员都清楚地知道，使用模糊数和模糊集合替代经典的数与集合，那么每个理论都会模糊化。在这种意义上，可以说经典的数与集合理论仅仅是模糊数和模糊集合理论的一种边界形式。例如，在控制文献中，可以发现经典的比例积分(PI)控制器是模糊控制器的一种边界形式^[4-6]，利用模糊逻辑可分析一些经典的控制方法^[7]。

当试图描述某个系统时,无论其简单与否,人们必须面对系统中的所有可能事件或现象不能辨识的事实。即使能够辨识,仍然会存在一个问题:在系统中一个特定的事件多久发生一次?对于事件的不完备知识以及发生频率的不可预测性难免要强制使用近似的系统模型。在控制系统理论中,有许多非常好的系统近似建模和控制算法设计的工具。对于那些能用二阶线性模型来描述的系统,存在许多设计PI和PID控制器的方法;而对于那些使用高阶线性模型来建模的系统,可以采用如极点配置方法或者频域设计方法。当然,我们也可以通过优化某些准则(如积分判别准则、方差最小准则等)得出控制算法。一般地说,过程与模型匹配得越好,基于近似的系统模型设计的控制算法所控制的系统其响应也就越好。

问题是当系统的模型是未知的,或者虽然是已知的,但是非常复杂,那么使用经典的分析方法设计控制器是不切实际的。也有一些情况,比如系统的模型是高度非线性的,并且参数的变化和参数的变化率非常大。这些情况中的一些可以使用自适应控制方法来解决^[8-11],但是所需的基本数学装置相当复杂,且通常需要大量的迭代计算。以参考模型和信号自适应为基础的自适应控制方案可以瞬时发挥作用(在第一次迭代中),但是只有简化和修改后才能使它们用于工程实践。

受外部强干扰影响的高度非线性过程的控制是一类特殊的控制问题。在实践中,这类系统的唯一解决方案是:操作员凭借其对系统静态及动态特性的长年实践经验与知识实施控制。控制质量通常与操作员的知识和经验成比例。操作员的经验与相关过程变量的监控有关,依据变量的状态及偏离参考值的程度,操作员决定其行为,以达到给定的控制目标。换句话说,操作员凭借经验运用如下的决策模式来执行他们的“程序”或“控制算法”:

IF
过程变量(如输入)的状态是…
THEN
需要这种控制行为(如输出)

在日常生活中有许多类似的例子,因此很容易理解这种控制类型。例如,驾驶汽车就是这种控制模式的一个典型应用。我们假设一种情况:当对面驶来的汽车距离较远时,驾驶员就会超越前面的汽车。在司机的众多可能行为中,我们仅仅谈论其中的一部分:

规则1(R^1)

IF
对面驶来的汽车距离较远
AND
前面的汽车行驶速度较慢
THEN

适度加速超车

规则 2(R^2)

IF

对面驶来的汽车距离较远

AND

前面的汽车正常速度行驶

THEN

加大速度超车

规则 3(R^3)

IF

对面驶来的汽车距离较远

AND

速度较快

AND

前面的汽车正常速度行驶

THEN

放弃超车且保持行驶速度不变

从这个例子中,我们可以得出结论:虽然驾驶员不能够精确地确定输入信息(距离、速度)和决策行为,但是他必须同时处理大量的输入信息,并做出有效的决策。对于不同的司机,规则 R^1 、 R^2 和 R^3 中的语言值远、高速、正常速度、适度加速、加大速度的解释也不尽相同。但是不管怎样,这些语言值在实际应用中是非常有效的,即使仅考虑同时行驶的汽车数量,也可减少撞车事故。这证明了非常有效的行为刺激机制是人类行为的前提和基础,它们惟一地取决于原因和结果的不精确语言值,这种原因和结果可以表达为非常简单或非常复杂的行为规则形式。

控制器设计人员面临的主要问题是:如何找到一种正规方式把系统操作员的知识和经验转换成设计良好的控制算法。在 IF-THEN 规则中,前提及结论部分的语言表达式描述了系统操作员的行为。运用多值模糊逻辑,可以把它们有效地转换为适于微机或经过特殊设计的模拟(数字)模糊处理器来实现的结构化控制算法^[12-16]。虽然在二值逻辑控制方案中已经运用了 IF-THEN 规则,但是由于模糊逻辑的引入,这种规则的前提及结论部分的真值已经发生了质变。

模糊算法具有通用逼近器特性,因此设计者能够使用一系列 IF-THEN 模糊规则来建模(辨识)未知的过程^[17-20],这使得利用模糊模型预测系统的未来状态,进而使引入前馈控制单元成为可能^[21]。另外,也存在操作员无法表达控制规则的情况(通常他们会说凭感觉)。在这种情况下,解决的办法是辨识控制行为,并用模糊规则进行描述^[22]。

需要注意的是,模糊逻辑运用并不仅仅局限于那些难以建模的系统^[23-29]。在数学模型已知,但比较复杂的系统上应用模糊逻辑,虽然控制质量不能总得到较大的改善,但是控制器设计和实际应用所需的时间将会大为缩短,有时甚至会减小到原来的 $1/10$ ^[30]。

模糊控制器的非线性特征有助于提高系统的鲁棒性。从控制观点来看,它们包含非线性要素而结构却相对简单。

在控制环内,模糊逻辑算法除了起主要控制器的作用之外,它还能用在自适应控制策略中以执行不同的任务,如调节传统控制器的参数^[31-35],或与其他智能控制方法并行运行,如遗传算法^[36]或人工神经网络^[37-42]。全面的神经模糊控制结构的综述见参考文献[43]。在应用领域,模糊逻辑算法的魅力在于对复杂系统设计所需的知识水平要低于传统控制器。

参 考 文 献

- [1] Zadeh, L.A., "Fuzzy sets," *Information Control*, 8, 94-102, 1965.
- [2] Chang, S.S.L. and Zadeh, L.A., "On fuzzy mapping and control," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-2, 30-34, 1972.
- [3] Zadeh, L.A., "Making computers think like people," *IEEE Spectrum*, 26-32, August 1984.
- [4] Brehm, T. and Rattan, K.S., "The classical controller: a special case of the fuzzy logic controller," in *Proceedings of the 33rd Conference on Decision and Control*, Lake Buena Vista, pp. 4128-4129, 1994.
- [5] Ying, H., Siler, W., and Buckley, J.J., "Fuzzy control theory: a nonlinear case," *Automatica*, 26, 513-520, 1990.
- [6] Tang, K.L. and Mulholland, R.J., "Comparing fuzzy logic with classical controller design," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 17, 1085-1087, 1987.
- [7] Tanaka, H., Uejima, S., and Asai, K., "Linear regression analysis with fuzzy model," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 12, 903-906, 1982.
- [8] Butler, H., *Model Reference Adaptive Control — From Theory to Practice*, Prentice Hall, New York, 1992.
- [9] Chalam, V.V., *Adaptive Control Systems — Techniques and Applications*, Marcel Dekker, Inc., New York and Basel, 1987.
- [10] Landau, Y.D., *Adaptive Control — The Model Reference Approach*, Marcel Dekker Inc., New York, 1979.
- [11] Kaufman, H., Bar-Kana, I., and Sobel, K., *Direct Adaptive Control Algorithms: Theory and Applications*, Springer-Verlag, New York, 1994.
- [12] Omron, *Clearly Fuzzy*, Omron Corporation, Tokyo, Japan, 1991.
- [13] Patyra, M.J., Grantner, J.L., and Koster, K., "Digital fuzzy logic controller: design and implementation," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 4, 439-459, 1996.