

文章编号 1000-5013(2004)01-0001-04

# 智能控制理论与系统的发展评述

王 永 初

(华侨大学机电与自动化学院, 福建 泉州 362011)

**摘要** 智能控制理论既是一种新型的控制理论,又是人工智能的基础.它具有非常丰富的研究内容,诸如专家系统、模糊控制理论、神经网络、遗传算法、混沌算法、博弈论及小波理论.智能控制系统广泛应用于工业生产过程自动化、电力系统、CAD/CAM、机器人、仪器仪表、机电工程等.文中着重分析智能控制系统的现状及存在问题,指出学术研究中的若干难点和工程应用中的关键性问题,并讨论解决这些难题的一些可行方案.

**关键词** 智能控制理论, PID 控制器, 进展与分析

**中图分类号** TP 18

**文献标识码** A

## 1 一门新兴的控制理论与系统

近 20 年来,智能控制理论(Intelligent Control Theory)与智能化系统发展十分迅速<sup>[1]</sup>.智能控制理论被誉为最新一代的控制理论,代表性的理论有模糊控制(Fuzzy Control)、神经网络控制(Neural Networks Control)、基因控制即遗传算法(Genetic Algorithms)、混沌控制<sup>[2]</sup>(Chaotic Control)、小波理论<sup>[3]</sup>(Wavelets Theory)、分层递阶控制、拟人化智能控制、博弈论等.应用智能控制理论解决工程控制系统问题,这样一类系统称为智能化系统.它广泛应用于复杂的工业过程控制<sup>[4]</sup>、机器人与机械手控制<sup>[5]</sup>、航天航空控制、交通运输控制等.它尤其对于被控对象模型包含有不确定性、时变、非线性、时滞、耦合等难以控制的因素.采用其它控制理论难以设计出合适与符合要求的系统时,都有可能期望应用智能化理论获得满意的解决.

智能或称人工智能(Artificial Intelligent)是基于人们对客观事物的认识由浅入深、滚动地发展,模拟人对客观对象或特定环境的响应与行为.以此构成的系统,有自适应(Self-Adaptation)系统、自学习(Self-Recognition)系统、自组织(Self-Organization)系统、自诊断(Self-Diagnosis)系统、自修理(Self-Repairing)系统<sup>[6]</sup>.智能控制系统的另一个类型是,基于知识工程和启发式的推理机制建立的专家系统、模式识别系统和自然语言理解系统.这类系统对复杂任务具有分析、调控、决策的能力,或克服干扰追踪目标,或去伪存真的能力.智能控制系统具有如下特点<sup>[7]</sup>: (1) 拟人智能化的运作模式; (2) 优胜劣汰的选择机制; (3) 多目标的优化过程; (4) 复杂环境的学习功能.由于这些显著的优点,人们期望在复杂对象上,实现实时性与容错性好、鲁棒性高的优化控制系统将会逐渐成为可能.这是一门被众多学者看好的、很有前途的新兴控制理论与系统.今天,模糊集理论、神经网络理论、遗传算法等及其应用技术已成为智能控制前沿性的课题,并已开始渗入到控制领域及以外的众多学科<sup>[8]</sup>.

同世界上许多学科一样,多种智能控制理论都经历了产生、不被重视到逐渐火爆的过程.如模糊理论是 1965 年 Zadeh 提出的,神经网络始<sup>[9]</sup>于 1958 年 Rosenblatt 提出的模拟人脑感知等概念<sup>[10]</sup>,小波技术则更早,1910 年 Harr 就提出小波的概念.但这些智能化理论在当时都没受到学术界的重视.直至 20 世纪 80 年代,信息技术与网络技术获得迅速发展,才为高级算法应用与实施提供了可能性.自此,人们才重新评价智能控制在科学技术、工农业生产、社会经济的方面的应用前景,才对智能控制理论有

**收稿日期** 2003-09-13

**作者简介** 王永初(1937-),男,教授,主要从事控制理论与应用的研究. E-mail: ycwang@hqu.edu.cn

**基金项目** 国务院侨务办公室重点科研基金资助项目(03QZR13)

了更新、更正确的认识.在测控领域,智能化理论及其应用研究,应首推 PID 智能控制器<sup>[11]</sup>.

## 2 智能控制器是智能化理论的成功范例

自动化领域是智能控制理论应用最具活力的一个领域,不仅使自动化系统品质大大提高,而且促进了自动化工具的研究、开发与生产.这里分析具体一例. PID 控制器问世至今已经经历了 60 多年的应用考验,已证明是一种非常成功的控制器结构模式<sup>[12]</sup>. PID 控制器早在 20 世纪 40 年代末被广泛应用于过程控制,至 90 年代初期,一些 PID 的非传统应用领域,如电气传动、机电工程、机器人等, PID 控制器越来越显示出生存活力.这主要有 3 种原因. (1) 由 P(比例功能)、I(积分功能)、D(微分功能)3 种功能,组合的 PID 控制器是一种拟人智能化控制器. P 功能模拟人的按偏差的快速粗调操作, I 功能模拟人的按偏差的仔细缓慢操作, D 功能模拟人的按偏差的变化速度实施的提前性操作. (2) 人们对 PID 有相当丰富的参数整定经验与使用经验. (3) PID 控制器处于正常优化状态下(如 1/4 衰减状态)具有 6 dB 的振幅稳定裕度与 450~600 的相角稳定裕度.因此,有天然的系统鲁棒性.

随着时间迁移,自动化设备软、硬件日新月异发展.先后经历了基地式仪表、单元组合仪表与组装仪表、DDC 工业控制机、DCS 与 PLC,发展到目前的现场总线系统(FCS).不管哪一代, PID 控制器的算式都在发展,智能控制功能也越来越丰富.但是,最引人注目的是自整定 PID 控制器,这是一种典型的智能控制仪表装置,可以适应复杂对象与复杂环境的优化控制.20 世纪 70 年代末至 80 年代中期,日本东芝公司推出的 Fuji Micrer 自整定调节器、美国 Foxboro 公司的 Exact 自整定调节器、日本横河电机株式会社的 YS-80 专家自整定调节器,都有智能化控制器的特征.80 年代后期,发达国家在 DCS 系统中都将仿人智能控制的软件植入系统,美国 Honeywell 公司的 TIDG3000 就有这种功能.90 年代以后,智能 PID 控制器更有长足的发展.专家系统、模糊理论、神经网络、遗传算法等被大量应用于在线 PID 参数寻优或非模型的控制,将 PID 智能化推到一个新境界<sup>[13]</sup>.

目前智能 PID 控制器的研究有 3 种主要类型:专家系统型、Fuzzy-PID 型及 NN-PID 型.专家系统型 PID 智能控制器,根据专家整定 PID 参数的经验已形成规则,存放于专家系统的知识库,将实时获取的观测数据与历史数据存放于数据库.按照启发式的推理机制,选择合适的 PID 参数,并对 PID 控制器的参数实施在线、实时修改决策.专家 PID 整定规则,主要有 Ziegler-Nichols 基于控制衰减比整定规则表、Graham-Lathrop 基于 ITAE 准则最优的整定规则表、Chien-Hrones-Resnick 基于典型对象特性的整定规则表、Brown 与高桥基于频率响应裕度的整定规则表和 Astrom 基于继电切换的整定规则表.这类整定规则已获得广泛应用并获得普遍的认可,这些规则存放于知识库.通过在线、实时检测系统运行的状态或输入—输出数据,应用“if 条件函数  $X_i$  then 决策函数  $Y_j$ ”类似于人们查阅字典的推理决策,可以迅速找出 PID 的 3 个整定参数  $K_p$ (比例增益)、 $T_i$ (积分时间)、 $T_d$ (微分时间).专家型 PID 智能控制器研究时间最长,技术比较成熟,并已有产品出售,如 Foxboro-EXACT. Fuzzy-PID 型智能控制器与 NN-PID 智能控制器是近几年来处于研究热态的课题,技术上尚不够成熟,但前景被普遍看好,出现了各式各样的 Fuzzy-PID, NN-PID, GA-NN-PID 智能控制器.智能控制理论在控制器方面,尤其是在 PID 控制器方面,应用是比较成功的. PID 控制器是智能控制理论成功应用的一个范例.

## 3 某些难点问题

虽然智能控制理论曾成功用于 PID 智能控制器的设计,但从总体看,应用尚不够成熟.这里以 Fuzzy-PID 与 NN-PID 为例.当前介绍的 Fuzzy-PID,其实是二维模糊控制器.该控制器有两个输入信号:控制误差  $e(t)$  与误差的变化速度  $de(t)/dt$ ,经模糊量化处理成模糊量  $E$  与  $EC$ ,送入模糊算法模块运算,产生输出决策  $U$ .再经反模糊化处理,变成闭环系统的统一信号.查阅大量的文献发现,几乎 Fuzzy 控制器都属于这种类型.二维模糊控制器的输出决策  $U = f(K_e E, K_{ec} EC)$ ,其控制功能类似 PD 控制器.这就显露 Fuzzy 控制器有一个本质上的缺点,这就是二维模糊控制器无法消除自衡被控制对象的静态控制偏差(余差).近年来,已有一些学者开始注意到这个问题,相继提出了一些解决余差问题的方案.例如,构成三维、甚至更高维的模糊控制器.它同二维比较,复杂性大大增加,从在一张表上查的答案,变成或

在一本书、或在一个书架、或在一个图书馆内寻找答案。余差问题虽可解决,却产生了另一个问题——实时控制难以实现。因此,有人想到将二维模糊 PD 控制与确定性 PI 控制结合起来,取长补短。利用二维模糊控制的快速控制性和对非线性具有很高的适应能力的特点,结合 PI 控制器能消除余差的优点,研究了前置或后置、并联或串联等 4 种结合方式,或 Fuzzy 与 PI 或 PID 切换调节方式。随着研究的深入,发现问题也增加。如两种不同信号(模糊量信号与确定性信号)的衔接与匹配问题,两种信号是即时融合,还是持续融合,是逻辑切换、还是条件切换,至今尚没有令人信服的研究结果。Fuzzy 控制器在工程中的应用,成功的例子有蒸汽发电机、交流伺服系统、空调器、洗衣机。但几乎都是清一色的二维模糊控制器,结果不能令人满意。

神经网络控制器(NN-PID)是将传统的 PID 控制算式,改写成适用于神经网络加权运算的算式<sup>[14]</sup>,即  $PID = K_p(1 + 1/T_i s + T_d s) = W_1 + W_2/s + W_3 s$ 。以误差  $e = X_1$ ,  $\int e(t) dt = X_2$ ,  $de(t)/dt = X_3$ ,  $X_1$ ,  $X_2$  与  $X_3$  为 NN-PID 的 3 个输入信号,则输入信号加权运算  $X = W_1 X_1 + W_2 X_2 + W_3 X_3$ 。后经隐含层函数  $S(X)$  计算,  $S(X)$  较常采用 Sigmoid 函数,  $S(X) = [1 + \exp(-X)]^{-1}$ 。因此,采用向前三层结构的神经网络,可以实现完全微分型 PID 控制功能。当前 NN-PID 结构模型是这种型式,其实完全微分型 PID 控制器调节品质不如不完全微分型 PID 控制器,只是由于简单才用完全微分型的 PID 结构模型。这就是智能 NN-PID 控制器,控制效果不甚理想的主要原因。我们认为,采用不完全微分型 NN-PID 结构,有希望将此类控制器的控制品质与应用水平提高到一个新高度。这种改进型的 NN 结构,同样可以用向前三层 NN 网络思想,只是输入节点由原来的 3 个变成 5 个。其中两个是由 NN 网络的输出节点信号反馈,延时一拍或二拍产生的。这种形式的 NN-PID 智能控制器,由于有良好的抗高频(相对于系统的操作频率)干扰能力和平稳的调节性能,其控制品质优于完全微分型 NN-PID 智能控制器。只是因稍微复杂,涉足者寥寥。可见,NN-PID 控制器的研究,仅能视为处于初步的启发性阶段。

遗传算法(GA)引入神经网络,用于自适应寻找神经网络最优的参数,这也是智能控制器研究的热点<sup>[15]</sup>。神经网络一般参数寻优方法是 BP 算法。BP 算法在本质上是按梯度寻优的一种方法,容易陷入局部最优解。所以,它不是真正的全局优化。采用 GA 方法进行寻优,因寻优采用了“交叉”与“变异”,可使搜寻过程跳出局部优化区域。采用“选择”又使以往搜寻过程中的局域优化解保留与复制下来。所以,GA 寻优一直往大范围、全局性的最优状态点逼近,比梯度法或穷举法寻优,是一大进步。GA 算法应用 NN-PID 智能控制器的一个关键问题,是实时性问题,不少论文从寻优过程到求得结果都经历了七八代,有些甚至几十代,这是一个费时的过程。所以,提高 GA 的搜寻速度、保证系统的稳定收敛,仍有许多研究工作可做。

分析当前智能控制器在生产过程控制中的应用,不难看出这样的事实,即应用都比较单一,一般都仅起着代替控制系统中 PID 控制器的作用。自动化系统有许多类型,这些量大面广的系统若能引入智能化理论与方法,它不仅可以提高各类系统的应用水平与效益,而且可以大大丰富与扩大智能化控制器的应用领域。近期一个最有希望的领域是在先进控制(APC)基础上,逐一地将各类 APC 系统分离成两个组成部分。一个是可实施智能化控制的部分;另一个是无法实施智能化控制的部分。例如大滞后预估控制系统,由于滞后  $\exp(-s)$  是一种不可控的对象特性,再先进的控制方法或理论都无法克服对象的这种特性。只有在采用 Smith 预估补偿系统或内模控制系统(IMC)的基础上,才有可能通过优化或智能控制器的设计,获得理想的控制效果。因此,智能化技术与 APC 技术结合已成为生产过程自动化的一个必然趋势。这也是复合型的模糊 PID 控制器、神经网络 PID 控制器、或 GA 自适应 PID 控制器,尚待深入的研究领域。

无论是神经网络或模糊控制,直接应用于快速时变对象、非线性对象、大滞后对象与多干扰扰动对象都有困难。它可借助于过程控制的系统经典结构,构成 IMC, Smith 预估补偿、非线性补偿、变量平衡结构、解耦或逆控制等方法,使不良特性(大滞后、强干扰、高非线性等)得到弱化或抑制。在此基础上,实施 GA-NN-PID,或 GA-Fuzzy-PID 控制,可以获得更好的实际控制效果。但这种较有些深度的文章或复合型的应用实例,实在是微乎其微。最近有人试图利用 GA 算法,通过性能指标评价函数,决定模糊控制器的  $K_e$ ,  $K_{ec}$ ,  $K_u$  等参数;研究 GA 的编码、种群选择、迭代评价、交叉与变异概率选择等。这都是智能化控制理

论中有前途的研究课题.近几年来,混沌优化在 PID 控制系统中应用也颇受关注.混沌轨道对参数微变的灵敏性,使得混沌算法在控制系统的寻优或辨识中,成为一种颇具活力与吸引力的方法.

## 4 结束语

智能控制理论的研究已渗透到自动化与仪器仪表各个分支,并在众多学科得到应用,是一门新兴的、有前景的控制理论.同许多学科与理论一样,智能控制理论会有一个从不成熟到成熟的发展过程.各种智能控制理论都有一些学术上与工程上的难点,制约其发挥效益的瓶颈,要认真加以研究与解决.只要克服当前学术研究中的低水平重复,智能控制理论与系统一定会有一个较大的发展.

## 参 考 文 献

- 1 Collins R J. Studies in artificial evolution[M]. California: University of California Press, 1992. 1 ~ 6
- 2 Frank C H. Analysis and simulation of chaotic systems[M]. New York: Springer, 2000. 249 ~ 295
- 3 Ievrgelt Y N. Wavelets made easy[M]. Boston: Birkhauser, 1999. 1 ~ 5
- 4 王永初. 专家系统智能调节器的发展评述[J]. 自动化仪表, 1993, 13(3): 1 ~ 4
- 5 Saridis G S. Intelligent robot control[J]. IEEE Tran., 1983, A-C 28(5): 547 ~ 557
- 6 袁曹任. 智能控制研究的进展[J]. 信息与控制, 1994, (5): 257 ~ 261
- 7 涂序彦. 人工智能及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1988. 1 ~ 4
- 8 傅京孙, 蔡自兴, 徐光佑. 人工智能及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999. 112 ~ 156
- 9 李士勇. 模糊控制, 神经网络和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996. 1 ~ 4
- 10 Zurada J M. Introtion artificial neural systems[M]. New York: West Publishing Compang, 1992. 201 ~ 253
- 11 王启志, 王永初. 智能 PID 控制器的研究与进展[M]. 自动化仪表, 2002, 23(12): 1 ~ 4
- 12 王永初. 现代调节器及其应用[M]. 重庆: 重庆出版社, 1986. 312 ~ 578
- 13 焦李成. 神经网络系统理论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1996. 110 ~ 213
- 14 Misir D, Malki H, Chen G. Design and analysis of a fuzzy proportional-integral-derivative controller[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 79(3): 297 ~ 314
- 15 周 明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 1 ~ 5

## A Commentary on the Development of Theory and System of Intelligent Control

Wang Yongchu

(College of Electromech. Eng. & Auto., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou, China)

**Abstract** Intelligent control theory is a new control theory and the foundation of artificial intelligence. It has very rich contents of study such as expert system, fuzzy control theory, neural network, genetic algorithm, chaotic algorithm, game theory and wavelet theory. Intelligent control system has been widely applied to the automation of productive processes in industry, power system, CAD/ CAM, robot devices instrumentation, and electromechanical engineering. The author analyses the present state of intelligent control system and issues confronting us; and points out several difficult points in academic research and the crux of the matter in engineering application; and discusses some feasible plans for settling these difficult points.

**Keywords** intelligent control theory, PID controller, advance and analysis