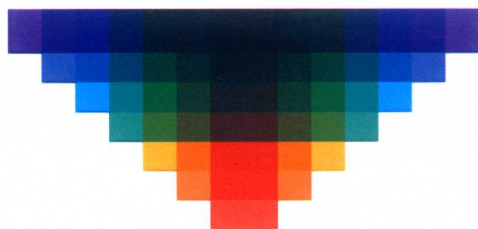


# 先进模糊智能 复合经典 PID 控制理论与应用及 其 Matlab 实现



刘经纬 周 瑞 朱敏玲 著

## 【资助项目】

首都经济贸易大学校内科研专项 (00791654490210)

首都经济贸易大学科研启动基金 (00791554410263)

首都经济贸易大学教学改革项目 (00791654210157)

北京中医药大学优秀青年骨干教师专项计划 (2016-JYB-QNJSZX014)

北京市教育委员会科技发展计划 (KM201611232011)

国家自然科学基金资助项目 (11401031)

国家自然科学基金资助项目 (61272375)

国家自然科学基金资助项目 (11402006)



首都经济贸易大学出版社

Capital University of Economics and Business Press



先进模糊智能  
复合经典 PID 控制理论与应用及  
其 Matlab 实现

刘经纬 周 瑞 朱敏玲 著

 首都经济贸易大学出版社  
Capital University of Economics and Business Press

· 北 京 ·

## 图书在版编目(CIP)数据

先进模糊智能复合经典 PID 控制理论与应用及其 Matlab 实现/刘经纬, 周瑞, 朱敏玲著. -- 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2016. 8

ISBN 978 - 7 - 5638 - 2562 - 2

I. ①先… II. ①刘… ②周… ③朱… III. ①PID 控制—应用—模糊控制—自动控制系统 ②Matlab 软件—应用—模糊控制—自动控制系统

IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 224243 号

先进模糊智能复合经典 PID 控制理论与应用及其 Matlab 实现  
刘经纬 周 瑞 朱敏玲 著

---

责任编辑 王 猛

封面设计 风得信·阿东  
FondesyDesign

出版发行 首都经济贸易大学出版社

地 址 北京市朝阳区红庙(邮编 100026)

电 话 (010)65976483 65065761 65071505(传真)

网 址 <http://www.sjmcb.com>

E-mail [publish@cueb.edu.cn](mailto:publish@cueb.edu.cn)

经 销 全国新华书店

照 排 北京砚祥志远激光照排技术有限公司

印 刷 北京九州迅驰传媒文化有限公司

开 本 710 毫米×1000 毫米 1/16

字 数 162 千字

印 张 9.75

版 次 2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5638 - 2562 - 2/TP · 43

定 价 28.00 元

---

图书印装若有质量问题,本社负责调换

版权所有 侵权必究

## 作者单位

首都经济贸易大学信息学院

北京中医药大学中药学院

北京信息科技大学计算机学院

## 项目资助

首都经济贸易大学校内科研专项(00791654490210)

首都经济贸易大学科研启动基金(00791554410263)

首都经济贸易大学教学改革项目(00791654210157)

北京中医药大学优秀青年骨干教师专项计划(2016 - JYB - QNJSZX014)

北京市教育委员会科技发展计划(KM201611232011)

国家自然科学基金资助项目(11401031)

国家自然科学基金资助项目(61272375)

国家自然科学基金资助项目(11402006)

## 前 言

本书是“北京燕山石化 60 路智能温控系统改造工程项目”的成果,对控制系统的控制参数自主在线优化与整定的需求、问题和方法进行了研究。本书研究的问题是基于模糊计算科学的人工智能方法及其在经典控制理论与实践中的应用与改进。

在对原硬件系统进行改造以满足新需求的过程中,本书重点研究解决经典控制方法受系统内部和外部不确定性因素的影响导致的两个问题(统称为“控制器参数在线优化整定问题”):一是对多路结构相同但内部、外部略有差异的被控对象,工程师需要使用相同的方法进行重复参数调试整定的问题,特别是对大惯性、有滞后的系统进行调试,会消耗大量时间和人力的问题;二是当系统运行环境发生变化后,控制器无法自动优化调整控制参数,系统无法达到控制性能要求的问题。

本书研究模糊智能复合经典(确定性)控制方法,结合不确定控制方法和人工智能优化、搜索方法的优点,参考了模糊自适应 PID 控制方法,设计出三种基于专家经验通过模糊控制器实现的自适应 PID 控制算法,通过理论推导、Matlab 计算机仿真和实际项目实施验证的途径对以上三种方法的稳定性、动态性能、静态性能进行了分析和验证,并根据需求实现了工程项目的硬件改造。

本书的创新与价值体现在以下三个方面：

第一，系统地描述了经典的模糊推理人工智能方法与经典 PID 控制相结合的智能的控制方法。

第二，系统地描述、实现并对比了多种先进模糊推理智能复合经典 PID 控制方法与实现。

第三，详细地给出上述各方法的理论推导、分析、Matlab 计算机仿真和具体实施过程。

# 目 录

1	绪论 .....	1
1.1	研究背景 .....	1
1.2	在研工程项目中遇到的实际问题 .....	2
1.3	国内外研究现状 .....	5
1.4	本书的主要工作与内容安排 .....	17
2	控制器参数在线优化整定方法的理论研究 .....	19
2.1	控制器参数在线优化整定研究方法概述 .....	19
2.2	普通 PID 控制与数字 PID 控制 .....	30
2.3	模糊控制理论与控制器参数优化整定方法 .....	35
2.4	专家经验与 PID 参数在线调试整定的优化器设计 .....	43
2.5	控制系统的被控对象研究方法 .....	53
2.6	控制系统稳定性分析方法 .....	59
2.7	控制系统稳态误差分析方法 .....	67
3	控制器参数在线优化整定方法的计算机仿真研究 .....	74
3.1	基于自适应模糊整定的 PID 参数在线优化整定方法 .....	74
3.2	基于增益式自适应模糊整定的 PID 参数在线优化整定方法 .....	81
3.3	基于专家经验规则表整定的 PID 参数在线优化整定方法 .....	86
3.4	各种 PID 参数在线优化整定算法的性能分析 .....	91

4	控制器参数在线优化整定方法对实际工程项目的改造 .....	99
4.1	燕山石化 60 路 PID 温控系统的改造方案概述 .....	99
4.2	燕山石化 60 路温控系统的硬件实验环境的搭建 .....	101
4.3	优化器的设计 .....	104
4.4	系统实际运行 .....	106
4.5	工程改造前后的结果分析 .....	110
5	本研究获得的实用新型专利与发明专利 .....	114
5.1	技术领域 .....	115
5.2	背景技术 .....	115
5.3	发明内容 .....	116
5.4	实施方式 .....	121
5.5	实施案例 .....	130
6	研究评价 .....	138
6.1	本书已完成的工作 .....	138
6.2	本书未完成的工作 .....	139
	参考文献 .....	141
	后记 .....	147

# 1 绪论

本章从工业控制智能化改造中遇到的实际问题出发,对国内外相关文献进行调研与分析,研究了控制器参数在线优化整定方法的可行性,学习了前人对相关领域进行的基础研究,为全书的研究工作做好准备。

## 1.1 研究背景

在目前的实际生产、工业过程控制中,模拟控制主要以 PID 控制等经典控制方法为代表,也有一部分系统采用了模糊控制和神经网络控制等智能控制算法。这些针对确定被控对象、确定工作环境的控制方法被称为经典控制方法,而采用的具体算法被称为经典控制算法。经典控制算法<sup>[1]</sup>在不同方面各有所长,但也存在着应用的局限性。

从智能化<sup>[2]</sup>方面讲,经典控制算法存在着以下共性。

(1) 控制器参数的整定工作是在系统投入使用之前进行的。在开发阶段,工程师凭借经验并通过现场试验完成对控制器参数的整定,参数配置的完成往往伴随着项目的完成和交付而终结。因此,系统控制参数在实际运行中不会改变,即被控对象无法根据运行环境的变化进行算法参数的调整和优化。

(2)对于很多同样的调试单元,重复调试工作不可避免。例如,在一个项目中有多路相同的被控对象,这些被控对象之间或多或少地存在着差异,特别是对于带有延迟、滞后或大惯性的被控对象来说,每一个被控对象的调试都会消耗大量的时间,占用大量的人力物力。

(3)对于多路同样的调试单元,由于其工作环境有所差别,须在系统运行前进行分别调试。如果系统运行后被控对象的工作环境有了变化,控制参数却不能随之改变,控制效果将变差,甚至会使误差增加,导致系统不稳定。

下面以实际项目为例来说明问题。本书研究的燕山石化 60 路 PID 温控系统工程中,面临着这样的问题:①每个加热回路结构相似,都是对一个加热罐加热,从室温加热到  $200^{\circ}\text{C}$ ,但是它们的工作环境略有不同,因此每路都需要单独调试,且调试时需要重复 60 次同样的工作。②被控对象是大惯性环节<sup>[3]</sup>,每次调试周期长达 1 小时,十分耗费时间与人力。③工艺要求系统超调量  $M_p$  尽量小(首次超调小于  $3^{\circ}\text{C}$ ,稳定时波动小于  $0.3^{\circ}\text{C}$ ),甚至希望没有超调,而单纯的 PID 控制得到的快速性和超调是成正比的,快速性的提高往往会引起超调量的增加,因此需要在不同的阶段,根据当前温度和当前温度变化率的变化改变  $P, I, D$  参数值。

根据上述分析,我们需要找到一种方法,让控制系统能够在运行前经过初步配置,开始运行后能够根据加热炉和环境的差异,自动将控制参数调整到最佳值,减少大量耗时的重复工作量。

## 1.2 在研工程项目中遇到的实际问题

本书的研究内容是燕山石化 60 路 PID 温度控制系统改造项目中遇到的实际问题。首先对改造前工程的设计方案做简单介绍:改造前的温控系

统是由单片机电路为下位机、计算机为上机构成的多路温度控制系统。

改造前的系统框图如图 1-1 所示。原有 60 路温控系统由一台计算机作为上位机进行总的监控,由单片机、A/D、D/A、通信模块构成的单片机系统构成下位机,下位机有 3 个,每个下位机控制 20 路加热炉,这 20 路加热炉控制电路分别安装在 5 个强电控制箱中,每个强电控制箱的输出连接 4 个加热炉。控制算法采用普通的 PID 控制方法。

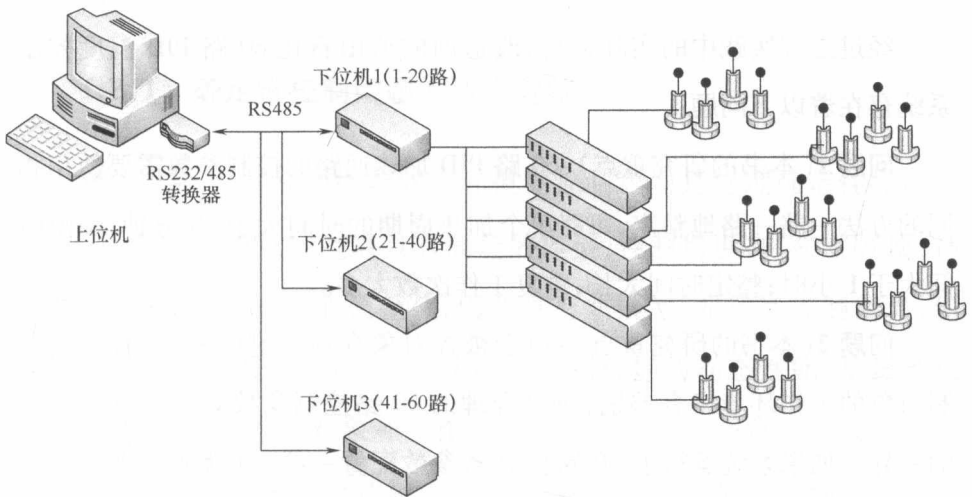


图 1-1 改造前 60 路 PID 温度控制系统框图

控制性能的要求是：

- (1) 目标加热温度  $T_f$  在  $200^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$  ;
- (2) 加热上升时间、稳定时间  $T_s$  尽可能短;
- (3) 首次达到目标值后超调量  $Mp_1 < 3^{\circ}\text{C}$  ;
- (4) 稳定后波动范围  $|e(t)| = |y(t) - r(t)| < 1^{\circ}\text{C}$  ;
- (5) 当目标加热温度  $T_f$  发生变化时,再次到目标值后超调量  $Mp_1 < 3^{\circ}\text{C}$  ;
- (6) 当目标加热温度  $T_f$  发生变化时,再次稳定后波动范围  $|e(t)| < 1^{\circ}\text{C}$  ;

(7) 当系统 60 路加热通道的某一路出现故障后,对这一路的维修要尽量少地影响其他通道的正常工作;

(8) 硬件系统中有需要维修的模块最好选用较为成熟的工业控制产品,这样做的好处是,维修时可以直接更换坏件,不仅可以减少维修造成的停产损失,而且可以降低对维修人员专业技术水平的要求;

(9) 实现 PID 控制参数在线优化整定方法,确保控制系统的稳定性、动态性能和稳态性能。

经过工程实践中的实际运行,改造前的燕山石化 60 路 PID 温度控制系统存在着以下问题:

**问题 1**(本书的研究重点):60 路 PID 加热通路的控制参数需要使用相同的方法一路一路地整定,每路单个加热周期的时间大于 30 分钟,降温时间大于 1 小时;整定时间太长,重复工作次数太多。

**问题 2**(本书的研究重点):由于被控对象存在一定的差异,且每路控制对象的工作环境略有差别,所以合理的 60 路控制参数必然会存在一定的差异。如果系统运行前 60 路控制器参数配置一样,这就要求系统运行后能够调整控制参数以适应被控对象和运行环境的差异。

**问题 3**(工程硬件改造,并非本书研究的重点):原有系统的下位机硬件电路不稳定,以及随着使用时间的增加,硬件电路的老化使得下位机经常出现故障,从而引发了两个维修上的问题:①维修下位机电路时工作量太大,特别是对于没接触过硬件系统设计工作的工程师来讲,维修工作甚至很难入手;②每次维修都要耗费大约一周的时间,而且在维修期间整个系统都要停止工作,造成了一定的经济损失。

## 1.3 国内外研究现状

针对本书研究的重点,即上述控制器参数在线优化整定问题,本书首先对国内外控制方法研究状况进行了调研,从确定性控制、不确定性控制、人工智能控制三个角度入手开展文献的检索和分析,得到对上述问题的求解思路。

### 1.3.1 确定性控制问题的研究现状

PID 控制<sup>[4]</sup>、神经网络控制<sup>[5]</sup>和模糊控制<sup>[6]</sup>均是处理确定性控制问题的有力工具。PID 控制器具有固定的模型,控制精度高,实现方便;神经网络、模糊控制器则非模型化,因此具有非模型、非线性控制能力,但实现起来较为复杂。PID 控制方法能够得到很好的动态性能,是最常见的控制方法,但对控制对象和工作环境的模型依赖性较高。在模糊控制系统中知识的抽取和表达比较方便,比较适合于表达那些模糊或定性的知识,其推理方式比较类似于人的思维模式。但一般来说,模糊系统缺乏自学习和自适应能力,要设计并实现模糊系统的自适应控制是比较困难的。神经网络则可直接从样本中进行有效的学习,它具有并行计算、分布式信息存储、容错能力强以及自适应学习等优点。一般来说,神经网络不适于表达基于规则的知识,因此在对神经网络进行训练时,由于不能很好地利用已有的经验知识,常常只能将初始权值取为零或随机数,从而增加了网络的训练时间或者陷入局部极小区域。总的来说,神经网络适合于处理非结构化信息,而模糊系统对处理结构化的知识更为有效。

图 1-2、图 1-3、图 1-4 是模糊控制、神经网络控制、PID 控制算法框图。为了抽象出经典控制算法的特点,本书将上述三种算法按照统一的形式进行描述。无论是哪种控制方式,它们都是由输入处理(包括反馈)、控制器、知识库、输出处理、被控对象五个部分组成,这五个部分被称作控制系统的五要素。因此,可以将以上三种经典的确定型控制问题进行抽象,得到它们共有的特征和模型,再做进一步分析和设计。

模糊控制的结构图如图 1-2 所示,其知识库就是模糊规则表,输入信号和输出信号的映射是由模糊规则表中的每条规则确定的,控制器是由模糊推理机经过清晰化处理输出给被控对象的。

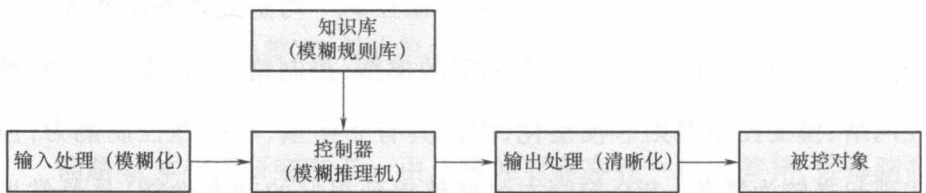


图 1-2 模糊控制算法框图

神经网络控制的结构图如图 1-3 所示。从表面上看,神经网络控制的知识库是由神经元相连接的权值决定的,但本质上,这些权值却是由训练样本经过反复训练得到的,因此可以认为神经网络的知识库是由样本数据构成的。

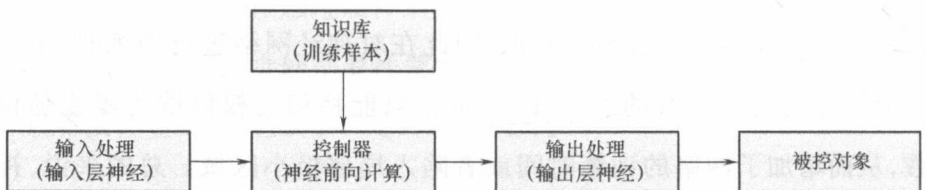


图 1-3 神经网络控制算法框图

PID 控制方法的知识库可以认为就是  $K_p, K_i, K_d$  三个参数,如图 1-4 所示。

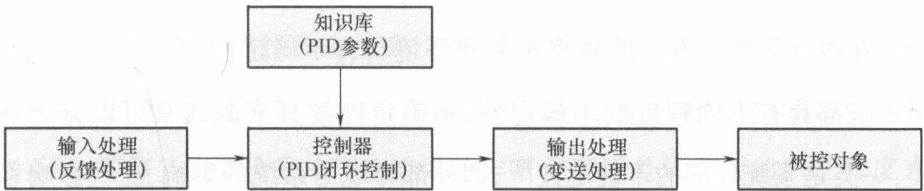


图 1-4 PID 控制算法框图

因此,为了得到一类解决确定性控制问题的算法,可以将上述各种控制算法,抽象总结成图 1-5 所示的框图。从中可以看出,控制器的输出是由知识库推理计算得到的,因此控制器参数在线优化整定算法的重点就是研究知识库的在线更新问题。

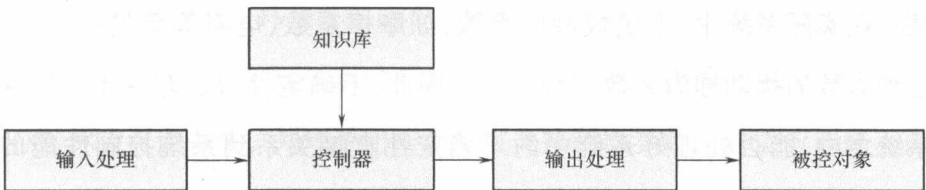


图 1-5 经典控制算法框图

具体地说,对于模糊控制,控制器参数在线优化整定算法要能够在线优化模糊规则表;对于神经网络控制,控制器参数在线优化整定算法要能够在线优化训练样本;对于 PID 控制算法,控制器参数在线优化整定算法要能够在线优化  $P, I, D$  参数。这就是说,对于各类经典控制算法,如果控制器参数在线优化整定算法能够在线优化知识库,就可能实现对控制系统的优化。因此控制器参数在线优化整定算法的核心问题,就是如何实现知识库的在线优化问题。

### 1.3.2 不确定性控制问题的研究现状

#### 1.3.2.1 不确定性控制产生的原因

在线优化整定方法的研究对象和环境具有不确定性<sup>[7]</sup>。任何一个实际系统都具有不同程度的不确定性,不确定性按其来源通常可以分为两类:一类是系统外部的不确定性<sup>[8]</sup>,即外部环境对系统的影响,这些影响可以等效地用许多扰动来表示。这些扰动通常是不可预测的:有一些测量噪声从不同的测量反馈回路进入系统,这些随机扰动和噪声的统计特性常常是未知的。另一类是系统内部的不确定性,又可以分为未建模动态和参数不确定性两个方面。在研究控制系统时,一般所依据的是已经建立的数学模型。但无论是利用理论分析还是利用实验分析所得到的都是简化的数学模型,使用这种模型不可能得到被控对象的全部动态特性。在实际系统中,系统模型的参数,如摩擦系数、电阻等会发生变化,这种参数的扰动称为参数不确定性。因此,不确定性普遍存在于非线性系统之中,能否处理好系统中的不确定性直接关系到系统控制性能的好坏。

一方面,实际系统中含有大量的不确定性,这些不确定性直接影响系统的性能;另一方面,非线性控制理论的进一步发展,势必要求对不确定非线性系统进行更加深入的研究。因此,研究不确定非线性系统不仅具有理论价值,而且更具有实际意义。对在线优化整定方法的研究是本书研究必不可少的准备工作。

#### 1.3.2.2 不确定性控制方法

本书研究的问题主要源于被控对象应用环境的不确定性因素,现有的不确定性控制理论主要有自适应控制<sup>[9-16]</sup>和鲁棒控制<sup>[17,18]</sup>。

其中,自适应控制是指在系统工作过程中,系统本身能不断地检测系统参数或运行指标,根据参数的变化或运行指标的变化,改变控制参数或改变控制作用,使系统运行于最优或次优的工作状态。

自适应控制系统的形式很多,有模型参考自适应控制系统、自校正控制系统、变结构自适应控制系统、神经网络自适应控制系统、模糊自适应控制系统,等等。但无论是从理论成果的丰富程度还是从应用的广泛程度来看,模型参考自适应控制系统和自校正控制系统应用最为成熟,是最为重要的两类自适应控制系统。

(1)模型参考自适应控制(MRAC)系统利用其可调系统的状态、输入和输出变量来度量某个性能指标,然后根据实测性能指标值与给定的性能指标集相比较的结果,由自适应机构修正可调系统的参数,或者产生一个辅助输入信号,以保持系统的性能指标接近给定的性能指标集。

MRAC系统由内环和外环两个环路组成,见图1-6。内环和常规的反馈回路类似,它由控制对象和可调控制器(包括前馈调节器和反馈调节器)组成,称为可调系统。外环是用来调节可调控制器参数的自适应回路。由于参考模型和控制对象并联,所以外界输入信号加到可调系统的输入端的同时也加到参考模型的输入端,这样参考模型的输出 $y_m$ 可以用来规定期望的性能指标。因此,应当这样规定参考模型:对于一个给定的输入信号,参考模型的输出 $y_m$ 是控制对象输出 $y_D$ 应当跟踪的期望值。可以利用减法器将参考模型输出与控制对象的输出相减,得到广义误差信号。自适应机构按一定的规则利用广义误差信号来修改可调控制器的参数,使广义误差的某个泛函最小,当可调系统趋近参考模型时,广义误差就会趋于极小或下降到零。