



书中所有程序的源代码可通过UC浏览器扫描二维码免费下载。

系统辨识与自适应控制 MATLAB仿真 (第3版)

庞中华 崔红 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

MATLAB®
examples

(1) 内容简练、系统性强。

书精选典型算法,首先介绍其真实例,介绍算法的实现,展示

(2) 实用性强。本书介绍

且尽量使编写的程序通用化,使读者能方便地应用于自己的研究对象,并提供了相应的MATLAB仿真程序供读者学习参考。

(3) 灵活性强。本书介绍的

具体算法的实现过程有更直观的图形界面,且提供了相应的MATLAB仿真程序供读者学习参考。

系统辨识与自适应控制

MATLAB 仿真

(第3版)

庞中华 崔红 编著

(1) 内容简练、系统性强。

书精选典型算法,首先介绍其真实例,介绍算法的实现,展示仿真效果,便于读者把握算法的本质。

(2) 实用性强。本书介绍的

且尽量使编写的程序通用化、模块化,使读者能方便地应用于自己的研究对象,并提供了相应的MATLAB仿真程序供读者学习参考。

(3) 灵活性强。本书介绍的

具体算法的实现过程有更直观的图形界面,且提供了相应的MATLAB仿真程序供读者学习参考。

全书共8章,主要内容分为以下三部分:

◆ 第一部分为绪论,即第1章,简要介绍

◆ 第二部分为线性系统辨识与自适应控制(第2~5章)及神经网络辨识(第6~7章)。

◆ 第三部分为非线性系统辨识与神经网络辨识及无模型自适应控制(第8章)。



配套资料(源程序)

本书中的MATLAB仿真程序是基于MATLAB R2017a编写的,读者可扫描下页二维码直接下载。

本书的编写得到了英国南安普顿大学刘开才教授、清华大学李华教授、北京理工大学徐教授和北京交通大学王教授的大力支持,在此向他们致以诚挚的谢意。另外,图书的编写和出版还要感谢通

北京航空航天大学出版社

学基金项目(51673023)的资助

1800158010; 图书定价: 39.00元

内 容 简 介

本书从 MATLAB 仿真角度出发,系统地介绍系统辨识与自适应控制的基本理论和方法。内容主要分为三部分:第一部分为绪论;第二部分为线性系统辨识与自适应控制,包括系统辨识(如最小二乘法、梯度校正法和极大似然法)、模型参考自适应控制、自校正控制和基于常规控制策略的自校正控制;第三部分为非线性系统辨识与自适应控制,包括神经网络辨识与控制、模糊控制与模糊神经网络辨识和无模型自适应控制。书中每种算法都配有仿真实例、仿真程序、仿真结果以及对仿真结果的简要分析,以便读者深入理解和灵活运用系统辨识与自适应控制的基本理论和方法。

本书内容简练,系统性和实用性强,可作为自动化相关专业本科高年级学生和硕士研究生的教学用书,也可供控制科学与工程相关领域的博士研究生、教师、科研人员以及技术开发人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

系统辨识与自适应控制 MATLAB 仿真 / 庞中华, 崔红
编著. -- 3 版. -- 北京: 北京航空航天大学出版社,
2017. 7

ISBN 978-7-5124-2475-3

I. ①系… II. ①庞… ②崔… III. ①系统辨识—计
算机仿真—Matlab 软件②自适应控制—计算机仿真—
Matlab 软件 IV. ①TP317

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 182810 号

版权所有,侵权必究。

系统辨识与自适应控制 MATLAB 仿真(第 3 版)

庞中华 崔红 编著

责任编辑 董瑞

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316888

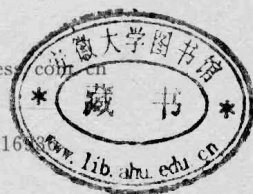
北京宏伟双华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:19 字数:486 千字

2017 年 7 月第 3 版 2017 年 7 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-2475-3 定价:45.00 元



前 言

目前,系统辨识与自适应控制理论已日趋成熟和完善,并被广泛应用于国民经济和国防建设的各个工程技术领域,包括航空、航天、航海、机器人、工业过程(如冶金、化工、机械、电力、热力、酿造、造纸等)、节能环保、生物医学、社会经济与管理等。有关系统辨识和自适应控制的书籍,国内外已出版数十种,但多数是对其理论和算法的系统性论述,对算法的实现问题涉及较少。为了弥补这一缺憾,本书在简要介绍系统辨识与自适应控制基本理论和方法的基础上,给出了具体算法的实现步骤,并提供了相应的仿真实例和 MATLAB 仿真程序供读者学习参考,可帮助读者快速地学习、掌握和应用这一领域的基本理论和方法。因此,本书具有以下特色。

(1) 内容简练、系统性强。由于系统辨识与自适应控制理论方面的著作已很多,因此,本书精选典型算法,首先介绍其理论背景和简单理论推导,然后给出算法的实现步骤,并通过仿真实例,介绍算法的实现,展示仿真效果,便于读者把握算法的本质,掌握和巩固所学知识。

(2) 实用性强。本书介绍的每种算法及重要的基础知识都配有 MATLAB 仿真程序,而且尽量使编写的程序通用化、模块化,读者只需修改程序源代码中的对象参数即可实现指定被控对象的参数估计和控制器设计。

(3) 灵活性高。本书所有的 MATLAB 程序均采用 M 文件进行原始编程,能够让读者对具体算法的实现过程有更直观的理解和掌握,同时也避免了相应技术 MATLAB 工具箱固定模式的限制,读者只需对书中程序代码稍作修改,即可进行算法的设计与仿真。

全书共 8 章,主要内容分为以下三部分。

- ◆ 第一部分为绪论,即第 1 章,简要介绍自适应控制理论的产生背景、种类及应用现状等。
- ◆ 第二部分为线性系统辨识与自适应控制,即第 2 章~第 5 章,主要介绍线性系统常用辨识方法(包括最小二乘法、梯度校正法和极大似然法)和线性系统典型自适应控制方法(包括模型参考自适应控制、最小方差自校正控制、广义预测控制以及基于常规控制策略的自校正控制)。
- ◆ 第三部分为非线性系统辨识与自适应控制,即第 6 章~第 8 章,主要介绍非线性系统的神经网络辨识与控制(包括 BP 神经网络和 RBF 神经网络)、模糊控制与模糊神经网络辨识以及无模型自适应控制(包括单输入单输出系统和多输入多输出系统)。

本书中的 MATLAB 仿真程序是基于 MATLAB R2017a 编写的,程序源代码均免费提供,读者可扫描下页二维码直接下载。

本书的编写得到了英国南威尔士大学刘国平教授、清华大学周东华教授、北京理工大学孙健教授和北京交通大学侯忠生教授的鼓励和帮助,在此作者谨向他们深表谢意。另外,图书的编写和出版还要感谢通过邮箱和论坛与作者进行沟通和交流的读者朋友们,以及国家自然科学基金项目(61673023)的资助。

在本书的编写过程中,参考或引用了参考文献中所列论著的有关内容,在此谨向这些论著的作者表示由衷的谢意。

由于作者理论和编程水平有限,书中的不足和错误,恳请读者批评指正并提出宝贵意见。

作者

2017年4月



配套资料(源程序)

本书所有程序的源代码均可通过 UC 浏览器扫描二维码免费下载。读者也可以通过以下网址下载全部资料: <http://www.buaapress.com.cn/upload/download/20171030xtbs.rar>。若有与配套资料下载或本书相关的其他问题,请咨询北京航空航天大学出版社理工图书分社,电话:(010)82317037,邮箱:goodtextbook@126.com。

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 自适应控制问题的提出	1
1.2 自适应控制的种类	2
1.2.1 模型参考自适应控制系统	2
1.2.2 自校正控制系统	3
1.2.3 智能自适应控制系统	4
1.2.4 其他形式的自适应控制系统	4
1.3 自适应控制的应用现状	4
1.3.1 在工业领域中的典型应用	5
1.3.2 在非工业领域中的应用	7
1.4 自适应控制存在的问题及发展方向	7
第 2 章 系统辨识	10
2.1 系统辨识概述.....	10
2.1.1 数学模型及建模方法.....	10
2.1.2 系统辨识的定义及其分类.....	11
2.1.3 参数模型.....	11
2.1.4 系统辨识的基本原理.....	13
2.1.5 系统辨识的步骤.....	14
2.2 白噪声、M 序列与噪信比	15
2.2.1 白噪声与有色噪声.....	15
2.2.2 M 序列与逆 M 序列	18
2.2.3 噪信比.....	20
2.3 最小二乘参数估计法.....	25
2.3.1 批处理最小二乘法.....	25
2.3.2 递推最小二乘法.....	29
2.3.3 遗忘因子递推最小二乘法.....	33
2.3.4 递推增广最小二乘法.....	37
2.4 梯度校正参数估计法.....	40
2.4.1 确定性系统的梯度校正参数估计法.....	40
2.4.2 随机牛顿法.....	43
2.5 极大似然参数估计法.....	45
2.6 多变量系统参数估计.....	49



第 3 章 模型参考自适应控制	55
3.1 连续系统数值积分基础知识	55
3.1.1 欧拉法	55
3.1.2 龙格-库塔法	56
3.2 基于梯度法的模型参考自适应控制	58
3.2.1 MIT 自适应律	58
3.2.2 MIT 归一化算法	62
3.3 基于 Lyapunov 稳定性理论的模型参考自适应控制	65
3.3.1 Lyapunov 稳定性理论与正实传递函数	65
3.3.2 可调增益 Lyapunov-MRAC	70
3.3.3 系统状态变量可测时的 MRAC	73
3.3.4 Narendra 稳定自适应控制器	77
3.4 离散时间模型参考自适应系统	84
3.4.1 二阶系统的离散时间 MRAS	85
3.4.2 n 阶系统的离散时间 MRAS	88
第 4 章 自校正控制	95
4.1 Diophantine 方程的求解	95
4.1.1 单步 Diophantine 方程的求解	95
4.1.2 多步 Diophantine 方程的求解	98
4.2 最小方差自校正控制	102
4.2.1 单步输出预测	102
4.2.2 最小方差控制	103
4.2.3 最小方差间接自校正控制	108
4.2.4 最小方差直接自校正控制	111
4.3 广义最小方差自校正控制	115
4.3.1 广义最小方差控制	115
4.3.2 广义最小方差间接自校正控制	121
4.3.3 广义最小方差直接自校正控制	124
4.4 广义预测控制	128
4.4.1 预测控制的提出	128
4.4.2 预测控制的基本机理	129
4.4.3 广义预测控制	132
4.5 改进的广义预测控制	150
4.5.1 基于 CARIMA 模型的 JGPC	150
4.5.2 基于 CARMA 模型的 JGPC	157



第 5 章 基于常规控制策略的自校正控制	163
5.1 极点配置自校正控制	163
5.1.1 极点配置控制	163
5.1.2 极点配置间接自校正控制	171
5.1.3 极点配置直接自校正控制	176
5.2 自校正 PID 控制	181
5.2.1 常规 PID 控制	181
5.2.2 自校正 PID 控制	183
第 6 章 神经网络辨识与控制	189
6.1 基于 BP 神经网络的系统辨识	189
6.1.1 BP 神经网络.....	189
6.1.2 基于局部误差的 BP 神经网络辨识	189
6.1.3 基于全局误差的 BP 神经网络辨识	197
6.2 基于 RBF 神经网络的系统辨识与控制.....	204
6.2.1 RBF 神经网络	204
6.2.2 基于 RBF 神经网络的系统辨识.....	204
6.2.3 基于 RBF 神经网络的 PID 自校正控制	209
第 7 章 模糊控制与模糊神经网络辨识	217
7.1 引 言	217
7.2 模糊逻辑控制	217
7.2.1 模糊控制系统的设计	217
7.2.2 模糊控制 M 文件仿真.....	219
7.2.3 模糊控制 Simulink 仿真	228
7.3 模糊神经网络辨识	232
7.3.1 模糊系统和神经网络的比较	232
7.3.2 模糊神经网络	233
7.3.3 关系度聚类方法	234
7.3.4 补偿模糊神经网络	238
7.3.5 基于聚类的补偿模糊神经网络辨识	249
第 8 章 无模型自适应控制	257
8.1 动态线性化技术	257
8.1.1 紧格式动态线性化方法(CFDL)	257
8.1.2 偏格式动态线性化方法(PFDL)	258
8.1.3 全格式动态线性化方法(FFDL)	258
8.2 SISO 无模型自适应控制.....	258



8.2.1 基于CFDL的无模型自适应控制 258

8.2.2 基于PFDL的无模型自适应控制 262

8.2.3 基于FFDL的无模型自适应控制 268

8.3 MIMO无模型自适应控制 272

8.3.1 基于CFDL的MIMO无模型自适应控制 272

8.3.2 基于PFDL的MIMO无模型自适应控制 278

8.3.3 基于FFDL的MIMO无模型自适应控制 286

参考文献 294

第1章 绪论

一般来说,要设计一个性能良好的控制系统,需要清楚了解被控对象的动态特性。然而,现实中有一些被控对象的动态特性是事先难以确知的,或者它们的特性是经常变化的。对于这类对象,常规反馈控制方法的效果往往难以令人满意,如何为其设计一个高性能的控制系统,就是自适应控制所要研究的问题。

1.1 自适应控制问题的提出

在实际控制工程中,有各种各样的被控对象,它们的机理、复杂程度和环境条件可能各不相同,但对它们施加控制的目的却是相同的,都是为了使它们的状态或运动轨迹符合某些预定要求,使它们的运行状况满足预定的性能指标。

如果被控对象的传递函数已知,则可用经典控制理论设计一种控制器,使控制系统的动态性能指标,如超调量、振荡次数、过渡时间和通频带等符合要求;若掌握了被控对象的运动方程,就可以用最优控制理论设计一种最优控制器,使控制系统的某项性能指标达到最佳,如能耗最小、运行时间最短、跟踪指令信号的速度最快以及输出方差最小等。但上述两种理论都是以被控对象的动态特性事先已知且在运行过程中不发生未知变化为前提的。

然而,由于受到以下不确定因素的影响,要事先完全掌握被控对象的动态特性几乎是不可能的。

① 被控对象的精确数学模型无法建立。现代工业装置的特征既精细又复杂,除了比较简单的情形外,被控对象总是或多或少具有某些非线性、时变性、分布性和随机性。由于受到试验装置、测量仪表、试验时间和建模方法等方面的限制,依靠机理分析法和(或)实验法,要建立精确的数学模型几乎是不可能的。而且,即使得到了精确的模型,其维数可能很高,这样的模型所描述的非线性特性或时变特性等对控制系统设计的作用也是微乎其微甚至是完全无益的。

② 即使能够为被控对象建立结构较简单且精确的数学模型,但其特性在运行过程中也会发生变化。如:导弹在飞行过程中,其重量和质心位置随着燃料的消耗而变化;化学反应速度随催化剂活性的衰减而变慢;机械手的动态特性随臂的伸屈而变化;某些装置随时间的推移磨损程度不同;等等。而且,变化规律往往难以掌握。

③ 被控对象还受到环境条件的影响。如:导弹或飞机的气动参数随其飞行速度、飞行高度和大气条件的变化而在大范围内发生变化;化学反应过程的参数随环境温度和湿度的变化而变化;船舶的动态特性随负载情况、水域状态、气候状况而变化;等等。环境干扰可分为随机干扰和突发性干扰,前者如各种各样的噪声,后者如大雨、阵风或负荷突变等。这些干扰有的不能测量,有的虽能测量但无法预计它们的变化。

对于受到如此众多不确定性因素影响的被控对象,要为其设计一个满意的控制器是相当困难的。针对这类问题,经过多年的努力,人们已建立和发展了一种适用的控制方法,即自适

应控制(adaptive control)。与传统的调节原理和最优控制不同,自适应控制能在被控对象的模型知识或环境知识知之不全甚至知之甚少,使系统能够自动地工作于最优或接近于最优的运行状态,获得高品质的控制性能。

1.2 自适应控制的种类

在日常用语中,“适应性(adaptive)”是指生物改变自己的习性以适应新的环境的一种特征。自适应控制是指通过改变控制系统行为以适应被控对象动态特性和环境条件变化的控制策略。

自从 20 世纪 50 年代末,由美国麻省理工学院(MIT)提出第一个自适应控制系统以来,先后出现过多种不同类型的自适应控制系统,如模型参考自适应控制系统、自校正控制系统、自寻最优控制系统、变结构控制系统和智能自适应控制系统等。但从理论研究成果和实际应用情况来看,应当首推模型参考自适应控制系统、自校正控制系统和智能自适应控制系统^[1-2]。

1.2.1 模型参考自适应控制系统

模型参考自适应控制(model reference adaptive control, MRAC)是从模型跟踪问题或模型参考控制(model reference control, MRC)问题引申出来的。在 MRC 中,只要设计者非常了解被控对象(其模型已知)和它应当满足的性能要求,即可提出一个被称为“参考模型”的模型,用以描述期望的闭环系统输入、输出性能。MRC 的设计任务是寻求一种反馈控制律,使被控对象闭环系统的性能与参考模型的性能完全相同。

但在对象参数未知的情况下, MRC 是不可行的。处理这种情况的一种途径是,采用确定性等价方法,即用参数估计值代替控制律中的未知参数,从而得到了 MRAC 结构,如图 1.1 所示。

由图 1.1 可知, MRAC 系统由两个环路组成:内环和外环。内环与常规反馈系统类似,由被控对象和可调控制器组成,称为可调系统;外环是用于调整可调控制器参数的自适应回路,其中的参考模型与可调系统并联。由于可调系统的参考输入信号同时也加到了参考模型的输入端,所以参考模型的输出或状态可用来规定期望的性能指标。因此, MRAC 的基本工作原理为:根据被控对象结构和具体控制性能要求,设计参考模型,使其输出 y_m 表达可调系统对参考输入 r 的期望响应;然后在每个控制周期内,将参考模型输出 y_m 与被控对象输出 y 直接相减,得到广义误差信号 $e = y_m - y$, 自适应机构根据一定的准则,利用广义误差信号来修改可调控制器参数,即产生一个自适应控制律,使 e 趋向于 0,也就是使对象实际输出向参考模型输出靠近,最终达到完全一致。

由此可见,模型参考自适应控制系统的核心问题是如何确定自适应控制律,以便得到一个使广义误差 e 趋向于 0 的稳定系统。根据自适应控制律设计方法的不同,产生了各种不同的模型参考自适应控制系统。通常,模型参考自适应控制系统有如下 3 种设计方法。

① 局部参数最优化设计方法:主要有梯度法、牛顿-拉夫森法、共轭梯度法、变尺度法等。

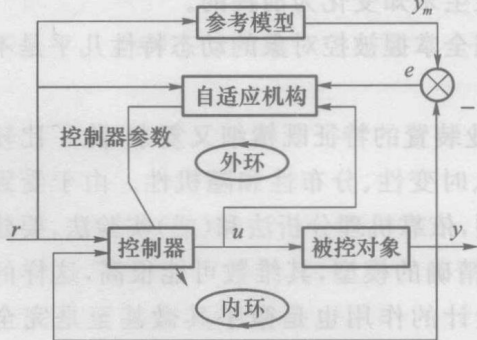


图 1.1 模型参考自适应控制系统结构

用局部参数最优化理论设计模型参考自适应控制系统是最早的一种方法,采用这种方法,必须具备两个基本条件:一是被控对象模型与参考模型之间的参数差值应比较小,或者说系统运行在参考模型参数值的邻域内;二是被控对象是一个慢时变系统。

即使如此,采用这种方法设计的模型参考自适应控制系统也不能保证系统总是稳定的。

② 基于 Lyapunov 稳定性理论的设计方法:为了克服采用局部参数最优化方法设计的 MRAC 无法保证稳定的缺点,众多学者采用 Lyapunov 第二方法(直接法),将设计自适应控制律的问题转化为稳定性问题,推导模型参考自适应控制系统的自适应律,以保证系统具有全局渐进稳定性,并具有更好的动态特性。

③ 基于 Popov 超稳定性理论的设计方法:用 Lyapunov 第二方法能成功设计出 MRAC,但 Lyapunov 函数选取较困难,且不是唯一的;而且,由于很难扩大 Lyapunov 函数的种类,因而也就限制了自适应律种类的扩展。这两方面都限制了 Lyapunov 第二方法设计 MRAC 的广泛应用,可采用 Popov 超稳定性理论来改善这种状况。

1.2.2 自校正控制系统

自校正控制(self-tuning control,STC)的思想最早是由 R. E. Kalman 在 1958 年提出的,他设计了基于最小二乘估计和有限拍控制的自适应控制器,并为了实现这个控制器,还建造了一台专用模拟计算机,但其发展受到了当时硬件问题的困扰。自校正控制的主要成就发生在 1973 年以后,这与当时计算机技术的迅速发展密不可分,K. J. Åström 等人对自校正控制的发展做出了突破性的贡献。

自校正控制系统的结构如图 1.2 所示。由图 1.2 可知,自校正控制系统也由两个环路组成:内环和外环。内环与常规反馈系统类似,由被控对象和可调控制器组成;外环由对象参数递推估计器和控制器设计机构组成,其任务是:首先由递推估计器在线估计被控对象参数,用以代替对象的未知参数,然后由设计机构按一定的规则对可调控制器的参数进行在线调整。由此可见,自校正控制器是在线参数估计和控制参数在线设计两者的有机结合,使得自校正控制方案非常灵活。各种参数估计方法和控制律的不同组合,即可导出不同类型的自校正控制方法,以满足不同系统的性能要求。

根据系统结构的不同,自校正控制算法可分为两类:

① 间接算法。如图 1.2 所示,首先利用历史输入/输出数据估计被控对象参数,然后通过设计机构获得控制器参数,而不是直接估计控制器参数,因此称这种自校正控制算法为间接算法(或显式算法)。

② 直接算法。如图 1.3 所示,直接利用历史输入/输出数据估计控制器参数的方法称为直接算法(或隐式算法),但前提是需要将控制系统重新参数化,建立一个与控制器参数直接关联的估计模型。

另外,在参数估计时,对观测数据的使用方式有两种。一种如图 1.2 所示不直接更新控制器参数,而是先估计被控对象模型本身的未知参数,然后再通过设计机构得到控制器参数,因此,称这种自校正控制算法为间接算法(或显式算法)。另一种是直接估计控制器参数,这时需要将过程重新参数化,建立一个与控制器参数直接关联的估计模型,相应的自校正控制算法称为直接算法(或隐式算法),其结构如图 1.3 所示。直接算法无须进行控制器参数的设计计算,因此,其计算量比间接算法稍小,但需要为其建立一个合适的控制器参数估计模型。

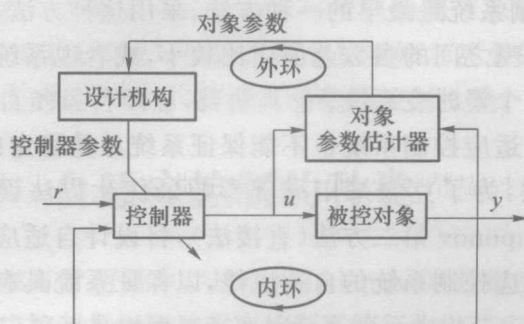


图 1.2 间接自校正控制系统结构

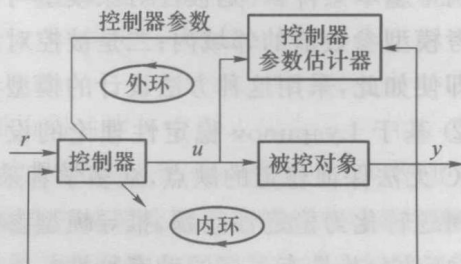


图 1.3 直接自校正控制系统结构

以上介绍了模型参考自适应控制和自校正控制,理论研究表明,二者在设计思想上没有本质的区别。实际上,MRAC 可视为 STC 的一种特殊情况。从历史发展上看,MRAC 源于确定性的伺服问题,最初是针对连续时间对象的伺服控制而发展起来的,而 STC 最初是针对随机环境下的离散时间对象,采用极小化方法而发展起来的;其次,两种控制系统的内环设计方法和外环调整内环可调控制器参数所用的方法不同,它们的差别仅此而已。

1.2.3 智能自适应控制系统

智能控制自 20 世纪 60 年代产生以来,发展十分迅速,特别是近 20 多年来,神经网络、模糊数学、专家系统、遗传算法等各门前沿学科的发展,给智能控制注入了巨大活力,由此产生了各种智能控制方法,如专家控制、模糊控制、神经网络控制、遗传算法及上述多种方法的组合等。将上述智能控制方法引入自适应控制中,则形成多种智能自适应控制,如专家自适应控制、模糊自适应控制、神经网络自适应控制、模糊神经网络自适应控制等。

1.2.4 其他形式的自适应控制系统

其他形式的自适应控制还有很多,如变结构自适应控制、非线性自适应控制、无模型自适应控制、鲁棒自适应控制、自适应逆控制、简单自适应控制(SAC)、监督自适应控制等。

1.3 自适应控制的应用现状

早在 20 世纪 50 年代末期,由于飞行控制的需要,美国麻省理工学院(MIT)的 H. P. Whitaker 教授首先提出模型参考自适应控制方法,并且用它来解决飞行器的自动驾驶问题,但限于当时的计算机技术和控制理论的发展水平,飞行试验没有成功。60 多年来,随着计算机技术的迅速发展和自适应控制理论的不完善,自适应控制已在很多领域获得成功应用,据不完全统计,已采用自适应控制技术的领域有:航天航空、航海、电力、化工、钢铁冶金、热力、机械、林业、通信、电子、原子能、机器人和生物工程等。

自适应控制最初主要应用于航天航空领域,虽然相应的理论及硬件设备还不成熟,在应用上遇到一些失败,但很多专家学者仍然坚持研究,并将其应用推广至其他工业部门。到 20 世纪 70 年代,随着控制理论和计算机技术的发展,自适应控制取得重大进展,在光学跟踪望远镜、化工、冶金、机械加工等领域的成功应用,也充分证明了其有效性^[2]。例如,在 24 英寸的卫



星跟踪望远镜的伺服系统中,采用模型参考自适应控制,跟踪精度提高了约6倍;在200 kW的矿石破碎机中采用自校正控制,使产量提高了约10%;在长网纸机中采用组合自校正控制,定量的标准差由PID控制时的 2.41 g/m^2 降到 1.32 g/m^2 ,每年每台纸机可获经济效益120万元;在水泥生料、配料中采用自校正控制,使水泥产量提高了5%~8%,而耗电量还减少了3%;在轧辊罩式退火炉中采用自校正控制,使控温精度达到 $\pm 3^\circ\text{C}$,由此,每年可获经济效益约100万元;在制药厂发酵温度控制中采用自校正控制,使控温精度达到 $\pm 1^\circ\text{C}$,最大不超过 $\pm 5^\circ\text{C}$ 。

20世纪80年代以来,自适应控制理论和设计方法得到了不断发展和完善,加上计算机技术的飞速发展,自适应控制技术的应用得到更大幅度扩展。目前,从美国新的登月计划到临床医学领域,自适应控制技术的应用方兴未艾。下面将介绍自适应控制近年来的应用现状^[3]。

1.3.1 在工业领域中的典型应用

1. 工业过程控制

工业过程自20世纪30年代后期以来已越来越依赖于自动化装置。反馈控制是通用的控制方法,经历了从PID控制到智能控制的发展历程。近40多年来,自适应控制策略在工业过程控制中获得了广泛的应用,主要包括化工过程、造纸过程、食品加工过程、冶金过程、钢铁制造过程、机械加工过程等应用领域。

大连理工大学的张志君(2005)将两个多层模糊神经网络分别用于化工过程辨识和控制,通过不断更新模糊隶属函数来实现自适应控制。结合运用BFGS(Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno)和最小二乘算法在线训练神经网络,使模型的精度得到提高,从而也大大提高了控制性能,克服了模型不匹配和时变的影响。

蒸煮过程是造纸工业中的一个重要环节,有着复杂的化学反应过程,具有较强的非线性、不确定性和大滞后特性,同时存在干扰和噪声,采用常规PID算法难以达到期望的控制效果。湖北工业大学龙毅(2006)采用无模型自适应控制器对蒸煮过程中的反应温度进行控制,能够克服蒸汽压力波动的干扰,保证了低温快速蒸煮真正的实施。

宝钢股份公司的羌菊兴等(2005)将高速稳态自适应控制技术拓展到带钢生产的头尾控制上,进一步减少了带钢头尾厚度超差的长度,提高了产品的质量和产量。

自动调节切削用量以适应切削过程中不断变化的加工条件,保证切削效果最优,这是自适应切削原理。美国密西根大学的A. Ulsoy等(1989)通过调整进给率来控制金属切削过程中的切削力,给出了分别用于切削和磨削的两种自适应控制系统。同时,还将自适应控制应用于加工过程的误差补偿和由切削力引起的刀具磨损的在线监测。

2. 智能化高精密机电或电液系统控制

自适应控制在智能化高精密机电或电液系统中应用较多的有以下几个领域:机器人、不间断电源、电机或液压伺服系统等。

加拿大宇航局的朱文红等(2005)提出通过直接测量负载单元的输出力实现液压缸输出力自适应控制的策略。输出力误差不仅用于反馈控制,而且用于动态更新摩擦模型的参数,这样可保证缸内压力误差和输出力误差的 L_2 稳定和 L_∞ 稳定。试验结果表明,缸内压力的良好控

制不仅能保证输出力的良好控制,并且自适应摩擦补偿比固定参数摩擦补偿效果更好。液压缸出力控制的优异性能使其动态性能在预定的带宽内与电驱动马达相当,从而可以用一个液压机器人仿效电驱动机器人。

圣玛利亚联合大学的 H. A. Grundling 等(1998)提出了一种修正的全局稳定的鲁棒模型参考自适应迭代控制方法,并用于一种单相不间断电源(UPS)的电压源 PWM 反相器及其相应的 RLC 负载滤波器的控制,获得了近似正弦的输出电压。同时,他们还提出了一种自适应方法用于对三相 UPS 的控制。

对于一类同时具有可重复和不可重复、不确定性的非线性系统,普度大学机械工程学院的 L. Xu 等(2001)将自适应鲁棒控制和迭代控制结合起来,构造了一种面向性能的控制律。在确定的已知边界条件函数下,迭代控制算法用来学习和逐步接近未知的可重复非线性,鲁棒性的构造则用于削弱各种不确定性的影响,尤其是不可重复、不确定性的影响,从而保证了直线电机驱动系统的瞬态特性和最终的跟踪精度。

江苏大学的孙宇新等(2005)基于单神经元设计用于感应电机矢量控制的自适应磁链和转速控制器,利用神经元的自学习功能在线调节连接权重,保证该控制系统良好的动态性能。

3. 航天航空、航海和特种汽车无人驾驶

飞行体表面的偏转所产生的力矩是速度、高度和攻角的函数,因此,飞行过程中其传递函数始终在发生很大的变化,线性控制系统无法获得满意的结果。随着飞机性能的不断提升,尤其是宇宙飞船的出现,航天航空领域对自适应控制的兴趣日益增加。美国宇航局(NASA)的 K. Guenther 等(2005)经过研究认为,必须对基于神经网络的自适应控制器性能进行适当的监测和评估,才能将其安全可靠地用于现代巡航导弹控制,并给出了利用贝叶斯方法的查证和确认方法及其在 NASA 的智能飞行控制系统中的模拟结果。辛辛那提大学的 G. L. Slater 等(2002)利用自适应方法大大改善飞机在起飞阶段的爬升性能预测,即根据测试和计算的功率比率自适应调整飞行器推力依赖度,这样有利于飞机在爬升过程中与空中的其他飞行器合流。

由于海况变化较大,大型船舶自动驾驶仪采用自适应控制取代传统的 PID 控制,可提高经济性、精确度和自动化程度。到 20 世纪 80 年代,除了航向,船舶的侧摆也可通过对方向舵液压伺服系统的自适应调节加以控制。

在装备 RTK GPS(real-time kinematic, global position system)传感器的农用车的精确导航中,传统的控制律在不打滑的情况下,能获得满意的控制精度;但是在有斜坡的湿地,打滑不可避免。R. Lenain 等(2003)设计了一种非线性自适应控制律,根据对打滑的实时评估来修正车辆的运动,使控制精度在打滑时仍得以保持。

4. 柔性结构与振动的控制

曼彻斯特大学的顾志强等(2005)结合 RBF 神经网络辨识器和 PID 神经网络控制器构成建筑结构自适应控制系统。对于受外部扰动(不同的地震载荷)的线性单自由度建筑结构,该控制方法能有效地抑制其振动。密西根科技大学的 J. F. Schultze 等(1997)对一种类似机翼的悬臂梁柔性结构采用自适应模态空间控制。对于时变系统,该控制器的频带较宽,且具有很好的解耦性能。

5. 电力系统的控制

自适应控制策略在电力系统中的应用主要包括:锅炉蒸汽温度和压力控制、锅炉燃烧效率的优化控制、互连电力系统发电量控制等方面。针对电厂主蒸汽温度调节的大时滞和不确定性,东北电力大学的顾俊杰等(2005)采用自适应 PSD(proportional, summation and derivative, 即比例、求和、微分)控制方法,并结合内模控制器进行调节。与传统的 PID 控制系统相比,自适应 PSD 控制算法简单、计算量小,并且能减少超调量、加快响应速度、缩短稳定时间。东南大学的胡一倩等(2003)对 PID 模糊控制器的参数进行自适应调整,并将其用于锅炉过热蒸汽温度的控制,取得了满意的效果。哈尔滨工业大学的徐立新等(2005)结合专家经验得出燃气轮机模糊 PI 控制规律,并据此设计了透平(涡轮)转速和排气温度的模糊自适应 PI 控制器,提高了燃气轮机的性能且实现非常方便。

1.3.2 在非工业领域中的应用

自适应控制在非工业领域中的应用目前虽不广泛,但已有成功应用的实例,显示出良好的应用前景。

1. 在社会、经济和管理领域中的应用

根据某一经济部门的产值发展规划,如何合理安排每年对该部门的投资量是经济决策中的重要一环。金元郁等(1991)根据经济系统的特点,改进了 D. W. Clarke 提出的广义预测控制,使其可以为经济的投资和发展提供一些有效的决策方案。美国明尼苏达大学武克强等(2005)通过灵敏度分析研究了将自适应控制理论应用于服务质量设计和保证中所存在的问题,并提出了一种自适应双重控制结构来降低这种局限性。新西兰纳皮尔大学管理学院 M. Pearson 等(2006)研究了当需求不确定时,报刊批发商如何自适应地确定最佳的报刊供应量,以使成本最低、利润最大。

2. 在环境和生物医学领域中的应用

在水处理过程中,投药单耗与原水的浊度和温度密切相关,而原水水质随季节改变,且每年相同季节的原水水质也会有所不同。叶昌明等(2003)研制了一种自适应控制投药设备,该设备可自动学习最佳投药控制规律,并根据水质及环境状态选择最佳投药量。

自适应控制在临床医学中的应用发展非常迅速。南加利福尼亚大学的 R. W. Jelliffe 等(1986)利用自适应方法来控制后续的庆大霉素血清药物浓度,采用基于贝叶斯方法的开环反馈自适应药物代谢控制系统,并仔细对照病人的临床表现与适用模型的输出(生理表现),医生就可以确定最适合该病人的治疗目标。清华大学的郝智秀等(1995)发明了一种假手握力自适应控制装置,以实现假手握物感觉的反馈,该控制装置使截肢者使用肌电假手时有真肢感。

1.4 自适应控制存在的问题及发展方向

自适应控制虽然具有很大的优越性,其应用也已硕果累累,但到目前为止,其应用仍不够广泛,仍然存在一些亟待解决的问题。现将其中的主要问题列举如下,并展望可能的解决方向^[2]。

1. 现场应用问题

目前所用的自适应控制技术的预选参数数目较多。这些预选参数往往与被控对象特性密切相关,而且有些参数(如采样周期等)的预选也十分困难,没有丰富理论知识和实践经验的人很难选好这些参数。因此,当被控对象存在不可知和不确切的因素时,这些预选参数只能凑凑。该方法趋于保守,将导致控制性能退化。此外,在现场调试时,自适应控制系统的调试参数数目也比常规 PID 调节器(3 个参数)多,而且相对难调,这对于十分熟悉 PID 控制调试的现场工程师也是一项艰难的任务。因此,必须解决自适应控制技术“好用”和“易用”的问题。为此,可能要像 PID 调节器一样,走仪表化的道路。

其次是启动过程和动态优化问题。这是由于自适应控制系统的状态和参数的初值选定尚无可靠和可行的理论和方法,因而,这些初值的选定往往带有一定的盲目性,使得所用状态初值和参数初值偏离真值甚远,造成启动过程激烈振荡。如果这种振荡超出物理装置允许的极限,就会影响装置的使用寿命甚至造成设备损坏。而且,有时出于全局考虑,往往要求自适应控制系统快速地从一种运行状态过渡到另一种运行状态。如果系统的稳定性较差,收敛速度较慢,再加上控制律不适当,就会出现漫长的不良瞬变过程,这显然对产品的产量和质量都不利。另一方面,从现有的自适应控制系统本身的性能来看,一个自适应控制方案仅能在一种工况下实现一个工序的优良控制,即仅具有对一个工序的局部鲁棒性,因而无法保证一个工序在起、停和变工况条件下的全局鲁棒性。因此,为了使一个工序全优,就必须解决起、停过程和变工况下的瞬变过程的动态优化问题。

此外,实际现场都存在突发干扰、非零均值干扰、周期性干扰和随机干扰等不同的干扰。不同现场的区别仅在于干扰类型的主次不同、强弱不同。所以,完全有必要发展一种完善的测量技术、滤波方法和消扰技巧来抑制所有干扰。

2. 理论保证问题

现有自适应控制系统的稳定性、收敛性和鲁棒性定理的成立条件都太强,实际应用的自适应控制系统很难满足这些条件,因而缺乏实际上的指导意义,使人不敢贸然投入一个新的自适应控制系统。因此,在实际工程应用中,特别是在投入一个新的自适应控制方案时,或把一个已有的自适应控制方案用于一个新的被控对象时,总希望事前能对这个自适应控制系统的稳定性、收敛性和鲁棒性提供一个理论保证,或提供一种确保自适应控制系统投入后的可靠性和安全性的技术和方法。所以,应大力研究并开拓这样的理论、方法和技术。

3. 被控对象的范围问题

对于线性定常或慢时变被控对象,现有的自适应控制方案显示了很强的生命力,但对于大量存在的非线性、时变和随机被控对象,就不那么得心应手了,从而形成这样一种尴尬局面:控制工程师只能针对一个实际对象解决一个具体控制问题,无法推广到另一个新的实际对象。进一步看,目前的绝大多数自适应控制方案都是基于解析设计法,因此,这些方案不可能考虑那些用现有数学方法尚不能描述或不能解决的问题,更不可能考虑那些根本无法用数学形式描述的现象或问题。例如,自适应控制系统中存在的非线性、多模态、变工况、混沌现象,以及各种干扰和非数学形态问题等。在这些情况下,若原封不动地采用现有的自适应控制方案,则