现代工业企业自动化丛书

计算机新型控制策略及其应用

袁南儿 王万良 苏宏业 编著

周德泽 主审

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书从工程应用出发,深入浅出地介绍了一系列在工业控制中行之有效的计算机控制策略,评述了它们的基本思想、主要特点和适用范围,具体介绍了专家控制、预测控制、鲁棒控制、自校正控制、模糊控制及神经网络控制等新型控制策略,给出了多个工程应用实例以使读者了解具体的实现途径。

本书主要对象是自动化及相关领域的工程技术人员,特别是他们进行知识更新和继续工程教育时,更是一本有益的参考书。本书也可作大专院校工业自动化、自动控制、计算机应用、机电一体化、仪器仪表等专业的本科生、研究生及教师的教科书及教学参考书。

版权所有,翻印必究。
本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

计算机新型控制策略及其应用/ 袁南儿等编著 . - 北京:清华大学出版社,1998
(现代工业企业自动化丛书)
ISBN 7-302-02921-0

Ⅰ. 计… Ⅱ. 袁… Ⅲ. 计算机控制-基本知识 Ⅳ. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 08605 号

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)
因特网地址: www .tup .tsinghua .edu .cn
印刷者: 昌平环球印刷厂
发行者: 新华书店总店北京科技发行所
开 本: 787×1092 1/ 16 印张: 11 字数: 257 千字
版 次: 1998 年 6 月第 1 版 1998 年 6 月第 1 次印刷
书 号: ISBN 7-302-02921-0/ TP·1548
印 数: 00014000
定 价: 14.50 元

《现代工业企业自动化丛书》编委会

名誉主任：张钟俊

顾　　问：吴钦炜

主　　任：白英彩

副 主 任：邵世煌　王行愚　吴启迪　孙廷才

编　　委：(按姓氏笔划)

于海川　王行愚　白英彩　孙振飞　孙廷才

江志道　刘元元　邵世煌　吴启迪　张兆琪

杨德礼　周德泽　柴天佑　虞孟起　魏庆福

序

当今世界先进工业国家正处于由“工业经济”模式向“信息经济”模式转变的时期,其中技术进步因素起着极为重要的作用,它在经济增长中占70%～80%。“以高新技术为核心,以信息电子化为手段,提高工业产品附加值”已经成为现代工业企业自动化重要的发展目标。从我国经济发展史来看,其工业经济增长主要是依靠投入大量资金和劳动力来实现的,尚未充分发挥技术进步在工业经济增长中的“二次效益倍增器”的作用。“如何加快发展电子信息技术、调整产业结构,适应世界经济发展需求”是当前我国工业企业自动化界研究的重要课题之一。

工业自动化是一门应用学科,它主要包括单机系统自动化、工业生产过程自动化和工业系统管理自动化等三个方面。企业自动化包括企业生产管理信息电子化、信息处理的自动化以及网络化。现代工业企业自动化涉及到自动化技术、计算机技术、通信技术、先进制造技术和管理学等诸多学科,它需要各学科的专家和工程技术人员通力合作,从而形成“多专业知识与技术集成”的现代工业自动化发展思路。目前工业企业自动化系统主要呈现开放性、集散性、智能性和信息电子化与网络化的特点。在现代工业企业自动化中,计算机控制技术充当了极为重要的角色,它是计算机技术和控制理论有机的结合。自动控制理论的发展是伴随着被控制对象的复杂性、不确定性等因素的研究成果而发展的,它由经典控制理论(频域方法)和现代控制理论(时域方法)发展到第三代控制理论——智能控制理论。计算机控制系统分为数据采集与处理系统、计算机在线操作指导控制系统、直接数字控制系统、监督控制系统、分级控制系统和集散控制系统以及分布式智能控制系统。从当前计算机技术和自动控制技术发展状况来看,高性能工业控制机系统、智能控制系统和基于网络系统的虚拟企业自动化系统将是未来工业企业自动化的重要发展方向。

从系统工程的角度来看,工业自动化技术研究与应用过程分为三个阶段:自动化技术研究阶段、科研成果向实用转化阶段和产品应用阶段。经过我国科技工作者半个世纪卓有成效的研究,在自动化技术研究与应用方面取得可喜的成绩,并给我国的工业自动化事业带来了深刻影响和变革,产生了巨大的社会和经济效益,其中有的技术已经接近或达到世界先进水平,但从应用以及成果向产品的转化的总体发展角度来看,仍存在着一些问题,仍需花大力气进一步探索和研究。例如,我国在工控机及其配套设备的生产方面尚需进一步构成规模经济;建立并发展企业网络及其协议和数据库集成技术,为全面实现我国“金企工程”提供技术和手段;开发系列的工控机软件包、实时操作系统,以提高工控机系统的总体水平;充分运用以工控机为核心的电子信息技术来改造我国各类传统工业的工装设备及产品;在我国的部分现代企业中大力倡导推行MIS,MRP-Ⅱ和CIMS/CIPS以及信息网络系统,以提高企业管理水平和竞争能力等。在20世纪40年代,计算机刚问世

不久,它的应用除在军事、政要部门之外,主要是在各传统工业领域的应用。在 60 年代～70 年代,各国的工业计算机应用极为普遍,促进了其工业企业自动化高速发展,而我国的工业企业自动化非但没有大踏步前进,反而停滞不前。到了 90 年代这个问题就显得十分严重了,因此我们必须“补上这一课”。我们编写了《现代工业企业自动化丛书》(以下简称《丛书》,目前暂定 42 册,并根据实际需要不断增加新的书目),该《丛书》内容既包括工业生产过程自动化,又包括现代企业管理自动化技术,如基于总线工控机系统、工程数据库、CIMS/ CIPS 以及企业网络技术等。其编写原则为:“理论与实践密切结合,为实现工业企业自动化提供典型示范系统”。编委会特邀请了国内在该领域有扎实理论基础和富有实践经验的专家分别承担各分册的编审任务,以期在向读者展示国内外相关技术的最新成果和发展动态的同时,提供解决现代企业自动化的思路、方法、技术和设备等。

该《丛书》以工程技术人员为主要读者对象。我们相信该《丛书》的出版必将在推动我国工业企业自动化应用的普及和发展进程中起到积极的作用,为进一步提高我国工业企业自动化水平做出贡献。

清华大学出版社颇具魄力和眼光、高瞻远瞩,及时提出组稿这套《丛书》的任务,他们为编好《丛书》做了认真、细致的准备工作,并为该丛书的出版提供了许多有利的条件,在此深表谢意。同时对于参加各分册编审任务的专家、学者所付出的艰辛劳动表示衷心感谢。编审《丛书》的任务十分繁杂而艰巨,加之时间仓促,书中出现疏漏、欠妥之处也是难免的,希望广大读者不吝赐教,以使我们逐步完善这个《丛书》系列。

中国科学院院士、上海交通大学教授

前　言

现代工业控制要求达到越来越高的设计目标,并在越来越复杂和不确定的环境下进行控制,以 PID 为核心的传统控制手段已难于适应。在这种生产实际的要求下,随着计算机技术特别是微处理机的发展,一系列新型控制方法应运而生。人们从应用数学、控制理论、工程实践等不同的角度和起点出发,对它们进行研究,成为十分活跃、经久不衰的热门领域。经过 20 多年的发展和应用,得到了许多优秀的结果,在工业控制中获得不少成功应用,证明了它们是计算机工业控制的主要手段,有广阔的发展前景。本书的目的,一是从工业应用出发,将这些种类繁多、涉及面广的新型控制策略予以归纳,介绍给读者,使之对计算机新型控制策略的全貌有一个系统的了解;二是对已在工业上获得成功应用的方法作较深入的介绍,使读者能掌握它们的主要思想、基本原理和设计方法;三是给出多个工程应用实例,以使读者了解具体实现的途径。本书中实例均已通过了正式鉴定并得到了成功的工业应用,其中,多数是本书作者及其同事们科研实践的经验总结和提高,另一些则取材于国内外一些学者的工作成果。

分析国内外有关资料,从工程应用角度出发,计算机新型控制策略主要包括有:自适应控制、变结构控制、预测控制、鲁棒控制、模糊控制、专家控制、神经网络控制以及遗传算法等。这些控制策略相互之间以及与各种传统控制策略之间渗透、交叉和结合,又形成各式各样的复合控制策略。在本书第 1 章中,对它们的基本思想、主要特点和适用范围进行了简要的评述,使读者从总体上有一个了解。其中,专家控制,作为智能控制的主要形式之一获得了较多的应用;预测控制,其深刻的思想内涵及在过程控制中的成效为人瞩目;鲁棒控制,其理论丰富但从工程应用上介绍它的专著甚少,故将这三部分内容分别在第 2,3,4 章中进行介绍。模糊控制作为一种应用面广、渗透力强的控制策略,自校正控制作为应用最为成熟的一种自适应控制,神经网络作为极富吸引力的新兴方向,这三部分在第 5 章中介绍。由于篇幅所限,其他的控制策略及更详细的内容,不能尽在本书之中。在讲述方法上,既强调工程应用,又不完全抛开必要的控制理论基础。力求深入浅出,讲清原理,着眼应用。

本书共分 5 章,袁南儿编写第 1,2 章,王万良编写第 3,5 章,苏宏业编写第 4 章。周德泽、诸静、俞立对全书作了审校。

由于作者水平有限,书中不足或缺点在所难免,恳请读者批评指正。

作　者

1997 年 11 月

目　　录

第 1 章　新型控制策略 …… 1
1.1　控制系统的构成 …… 1
1.2　传统控制策略 …… 2
1.3　现代控制策略 …… 4
1.4　智能控制策略 …… 8
1.5　控制策略的渗透和结合 …… 13
参考文献 …… 16

第 2 章　专家控制 …… 18
2.1　专家系统和专家控制 …… 18
2.1.1　专家系统 …… 18
2.1.2　实时专家系统 …… 20
2.1.3　专家控制 …… 21
2.2　专家控制系统的结构 …… 22
2.2.1　间接专家控制和直接专家控制 …… 22
2.2.2　直接专家控制的结构 …… 22
2.3　知识的表示和推理 …… 25
2.3.1　知识的含义 …… 25
2.3.2　知识表示 …… 26
2.3.3　产生式规则知识表示 …… 28
2.3.4　产生式系统的推理 …… 29
2.4　专家控制系统的设计 …… 32
2.4.1　模型描述 …… 32
2.4.2　信息处理和特征提取 …… 34
2.4.3　控制策略 …… 38
2.4.4　知识库 …… 39
2.4.5　自学习机构 …… 40
2.4.6　推理机 …… 40
2.4.7　数据库 …… 41
2.5　电机调速系统的专家控制 …… 41
2.5.1　全数字化直流调速系统 …… 42
2.5.2　控制模式 …… 44

2.5.3 调速专家控制器的设计 …… 46
2.5.4 调试运行 …… 50
2.6 板材同步剪切的专家控制 …… 52
2.6.1 工艺分析 …… 52
2.6.2 同步剪切控制系统组成 …… 53
2.6.3 塑料瓦楞板同步剪切专家控制系统设计 …… 54
2.6.4 工业应用 …… 56
2.7 配料系统的专家控制 …… 56
2.7.1 工艺分析 …… 56
2.7.2 专家控制器设计 …… 59
2.7.3 专家控制器实现及工程实践 …… 60
参考文献 …… 62

第 3 章 预测控制 …… 63
3.1 预测控制的基本原理 …… 63
3.2 动态矩阵控制 …… 64
3.3 动态矩阵控制的工程设计 …… 66
3.4 炼油厂加氢裂化装置的动态矩阵控制 …… 68
3.5 模型算法控制 …… 71
3.6 催化裂化分馏塔的模型算法控制 …… 74
3.7 广义预测控制 …… 75
3.8 基于正交数值逼近的实时预测算法 …… 78
3.9 电脑充绒机的预测智能控制 …… 80
3.9.1 电脑充绒机的工作原理 …… 80
3.9.2 高性能称重传感器设计 …… 81
3.9.3 基于产生式结构的充绒机预测智能控制规则 …… 82
3.9.4 计算机控制系统设计 …… 84
3.9.5 应用效果 …… 84
3.10 制冷系统的预测智能控制 …… 85
3.10.1 制冷系统的热力学过程分析 …… 86
3.10.2 智能优化控制规则 …… 86
3.10.3 微机控制冷库运行结果 …… 87
参考文献 …… 88

第 4 章 鲁棒控制 …… 90
4.1 引言和基本概念 …… 90
4.2 单输入单输出稳定系统的内模控制 …… 94
4.2.1 内模控制结构 …… 94
4.2.2 灵敏度函数及互补灵敏度函数 …… 95
4.2.3 两自由度控制器 …… 96

4.2.4 闭环系统渐近响应特性(系统型)…… 96
4.2.5 H_2 最优控制 …… 96
4.2.6 IMC 控制器设计方法和步骤 …… 97
4.3 一阶时滞系统的内模控制(IMC)设计…… 99
4.4 不确定系统的鲁棒二次镇定 …… 103
4.4.1 问题的描述和定义 …… 103
4.4.2 线性状态反馈控制 …… 105
4.4.3 匹配不确定系统的鲁棒镇定 …… 109
4.4.4 不确定时滞系统的鲁棒二次镇定 …… 111
4.4.5 基于观察器的鲁棒镇定 …… 115
4.4.6 同步汽轮发电机鲁棒控制仿真 …… 118
参考文献…… 121

第 5 章 其他新型控制策略…… 123
5.1 自校正控制 …… 123
5.1.1 自校正控制的结构 …… 123
5.1.2 参数估计的最小二乘法 …… 123
5.1.3 最小方差控制 …… 132
5.1.4 自校正调节器 …… 134
5.1.5 自校正调节器应用实例 …… 135
5.2 模糊控制 …… 137
5.2.1 模糊控制系统的组成 …… 137
5.2.2 模糊控制器的输入输出变量及其模糊化 …… 138
5.2.3 建立模糊控制规则 …… 140
5.2.4 模糊关系与模糊推理 …… 142
5.2.5 模糊控制向量的模糊判决——“清晰化” …… 143
5.2.6 模糊控制表 …… 144
5.2.7 确定实际的控制量 …… 144
5.2.8 模糊控制算法的工程实现 …… 145
5.2.9 酚醛树脂聚合反应温度模糊控制 …… 145
5.3 神经网络控制 …… 149
5.3.1 神经元数理模型及其学习算法 …… 149
5.3.2 BP 神经网络及其学习算法程序设计…… 152
5.3.3 Hopfield 神经网络及其 VLSI 实现 …… 153
5.3.4 神经网络在控制工程中的应用 …… 157
5.3.5 单神经元控制的直流调速系统 …… 160
参考文献…… 163

第 1 章　新型控制策略

1.1　控制系统的构成

从工业应用的角度看,控制系统包括了单回路控制系统、多回路控制系统、集散控制系统(Distributed Control System, DCS)、计算机集成生产系统(Computer Integrated Process System, CIPS)以及新近迅速发展的集传感、控制、执行和网络于一体的现场总线控制系统。这几种系统今天和今后仍然共存于各个工业应用领域中。这些系统在结构、规模、作用、功能、应用场合等方面有着许多、甚至是很大的差别,但它们的组成和运行的普遍机制仍然是控制论的反馈控制原理。从信息处理和控制的角度看,控制系统可以看成由施控系统和被控系统两部分组成,并运行于一定的扰动和环境中。如图 1.1 所示。

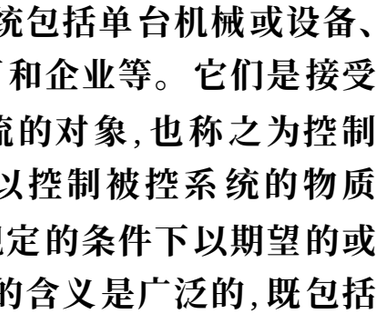


图 1.1　控制系统的组成

在工业应用领域内,被控系统包括单台机械或设备、生产线、生产过程、以及整个工厂和企业等。它们是接受物质流、能量流、信息流和资金流的对象,也称之为控制对象。施控系统产生控制作用以控制被控系统的物质流、能量流、信息流和资金流在规定的条件下以期望的或最优的方式运行。这里,“控制”的含义是广泛的,既包括通常意义下的闭环调节和伺服控制,也包括操作、指导、诊断、监督、优化、调度、计划、组织和管理等。施控系统和被控系统的划分应根据实际应用情况而定。例如,对一个生产过程采用三级计算机集散控制系统(图 1.2),当考察的重点是对生产过程进行控制时,我们将生产过程划为被控系统,而三级计算机组成的系统就是施控系统;当考察的重点是过程管理级如何实现各设备间的协调和优化过程控制时,就应将第一级计算机及生产过程视为被控系统,而上面二级计算机及有关设备组成施控系统;当考察的对象仅是生产线上某台设备单元时,又会将这一设备单元看成被控系统,而将控制它的微型机看成施控系统。

从应用的角度看,施控系统应包括传感、控制和执行三个部分。传感是获得被控系统的状态、输出和环境等方面信息的各种手段之总和,它包括测量物理变量的传感器—变送器,为获得某些不能用测量仪表测量的变量的软测量技术,以及多传感器信息融合技术等。执行则是产生施控系统最终输出信息的各种手段之总和,它可能是驱动部件(如调节阀、电机、继电器等),信息转换和通信部件(如与下级计算机的接口),显示、记录以及图、文、声等多媒体输出部件等。控制以计算机为主体,完成控制问题的求解,形成控制算法和控制策略,产生控制规律,它是控制系统的核心。抽象化后的控制系统如图 1.3 所示。有时,特别是着重研究控制策略而不关心信息的获取以及控制输出的实现时,将传感简化

图 1.2　三级计算机控制系统例

成一个求差器,并将控制、执行合称为控制器,得到图 1.4 的简化结构图。

图 1.3　控制系统结构图

图 1.4　控制系统简化结构图

控制策略(狭义地也称控制算法)是控制器的核心。在工业应用和理论研究中,经过长期的发展和实践检验,形成了一些有代表性的控制策略。从它们的发展过程和应用特点出发,大体上可以分为三类:传统控制策略,现代控制策略及智能控制策略。在本章中,从物理概念上简要地介绍它们的基本思想,使读者在总体上对它们有一个把握。在下述各章中,再从工程应用的角度对它们进行较详细的研讨。

1.2　传统控制策略

从模拟控制系统开始,到数模混合控制系统及计算机控制系统的长期发展过程中,形成了许多行之有效的控制方法,得到了广泛的应用。至今,它们仍活跃在各个工业领域中。特别是当它们和现代一些新兴的控制思想结合后,在解决实际工程问题中,更表现出强大的生命力。我们对它们冠以"传统"二字,主要指它们的历史悠久性和应用广泛性。以下介绍 PID 控制、Smith 控制和解耦控制三种主要的控制策略。

1. PID(比例 - 积分 - 微分)控制

这是具有几十年应用经验的一种算法,无论在模拟调节或数字控制中,都得到了广泛的应用。其原理如图 1.5 所示。到目前为止,大多数(有资料表明在 90%以上[1])工业控制回路仍采用各种形式的 PID 控制算法。这是因为该方法具有一系列优良的特点:

(1) PID 算法蕴涵了动态控制过程中过去、现在和将来的主要信息,而且其配置几乎最优。其中,比例(P)代表了当前的信息,起纠正偏差的作用,使过程反应迅速。微分(D)在信号变化时有超前控制作用,代表了将来的信息。在过程开始时强迫过程进行,过程结束时减小超调,克服振荡,提高系统的稳定性,加快系统的过渡过程。积分(I)代表了过去积累的信息,它能消除静差,改善系统静态特性。此三作用配合得当,可使动态过程快速、平稳、准确,收到良好的效果。图 1 .5(b)表示了 PID 控制器的控制作用。

图 1 .5　PID 控制器原理图

(2) PID 控制适应性好,有较强鲁棒性。对各种工业应用场合都可在不同的程度上应用。

(3) PID 算法简单明了,形成了完整的设计和参数调整方法。很容易为工程技术人员所掌握。

(4) 许多工业控制回路比较简单,控制的快速性和精度要求不是很高,特别是对于那些 12 阶的系统,PID 控制已能得到满意的结果。

(5) PID 控制根据不同的要求,针对自身的缺陷进行了不少改进,形成了一系列改进的 PID 算法。例如,为克服微分带来的高频干扰的滤波 PID 控制,为克服大偏差时出现饱和超调的 PID 积分分离控制,为补偿控制对象非线性因素的可变增益 PID 控制等等。这些改进算法,在一些应用场合得到了很好的效果。在一些低阶系统中,特别是伺服系统、电气传动系统中,PI 控制应用也很广泛。

正由于 PID 控制有上述许多优点,使它今天仍跻身于各种新型策略中并和它们结合,形成许多很有实用价值的复合控制策略。

PID 控制的显著缺点是不适用于有大时间滞后的控制对象,参数变化较大甚至结构也变化的控制对象,以及系统复杂、环境复杂、控制性能要求高的场合。

2 . Smith 控制

1957 年 Smith 在研究具有时滞的系统控制时提出了这一方法[2]。工业过程中的许多对象具有纯滞后特性。例如,物料经皮带传送到秤体,蒸汽在长管道内流动至加热罐,都要经过一定的时间后才能将控制作用送达被控量,即有纯时间的滞后。这个时间滞后使控制作用不能及时得到反应,扰动作用不能及时被察觉,延误了控制,会引起系统的超调和振荡。分析表明,在这种系统中,时间滞后因素 $e^{-\tau s}$ 将直接进入闭环系统的特征方

程,使系统的设计十分困难,极易引起系统不稳定;如果时间滞后 τ超过对象最大的时间常数的一半,采用 PID 控制就很难奏效了。解决大时间滞后的一个颇有成效的方法是在控制算法中增加 Smith 预估器:

$$G_p(s)(1 - e^{-\tau s})$$

式中 $G_p(s)$,τ分别为控制对象的传递函数和纯滞后时间。

将 Smith 预估器与控制器并联(如图 1.6 所示),理论上可以使控制对象的时间滞后得到完全补偿,控制器的设计就可不再考虑对象的时滞了。实际的控制算法作一些近似处理,也能得到很好的补偿效果。因此它在工业上获得了广泛应用。并且也和各种控制算法结合,形成了一些颇有实用价值的复合控制策略。

图 1.6 Smith 控制方框图

3. 解耦控制

工业应用中的许多系统都是多变量系统,其中各变量间存在耦合关联作用。在复杂的生产设备中,往往需要设置若干个控制回路来稳定各个被控制变量。在许多情况下,这几个控制回路间存在着相互关联,相互耦合,形成了多输入、多输出的相关控制系统。对这些系统,不能将它们当成几个独立的单回路系统而简单地采用单变量控制策略,必须用多变量控制策略来处理。多变量控制的核心是解耦控制,其基本思想是设计一个解耦补偿器(见图 1.7)来消除多变量系统中各有关输入-输出变量间的关联作用,使一个控制输入只对其相应的输出有影响,以把多变量系统分解成几个单变量系统。然后在每个已解耦的控制回路中,认为各控制器只对其相应的被控变量施加控制作用,从而可采用相应的单变量控制策略。

图 1.7 解耦控制方框图

解耦补偿器实际上是一种解耦算法,其实质是根据对象的传递矩阵建立一个补偿矩阵,使它们的总和(乘积)为对角线矩阵(完全无耦合)或对角线占优矩阵(松弛耦合)。在控制对象的耦合机理和数学模型比较清楚的系统中,解耦控制颇能奏效,它在许多工业过程控制中有成功的应用,是解决多变量耦合的一个广泛应用的工程方法。

其他一些控制方法,如另一种纯滞后补偿算法——Dalin 算法,以及在过程控制中应用的前馈控制、串级控制,在伺服控制中应用的最小拍控制等,可参阅文献[3]和[4]。

1.3 现代控制策略

传统的控制策略隐含着两个前提,一是要求对象的模型是精确的、不变化的,且是线性的;二是操作条件和运行环境是确定的、不变的。一般的工业系统只是粗略地、近似地满足这些条件,在要求不高的情况下是可行的。随着工业应用领域的扩大,控制精度和性能要求的提高,必须考虑控制对象参数乃至结构的变化、非线性的影响、运行环境的改变以及环境干扰等时变的和不确定因素,才能得到满意的控制效果。在实际应用需求的激励下,在计算机的高速、小型、大容量、低成本所提供的良好物质条件下,一系列新型控制策略应运而生,并迅速在实际中得到应用、改进和发展。现将研究和工业应用较多的几个有代表性的控制策略介绍如下。其他一些现代控制策略,如推断控制、容错控制等,也有不少研究和应用,在此不一一叙述。

1. 自适应控制

自适应控制是针对对象特性的变化、漂移和环境干扰对系统的影响而提出来的。它的基本思想是通过在线辨识使这种影响逐渐降低以至消除。50 年代末美国麻省理工学院提出了第一个自适应控制方案,但由于实现上的困难和计算上的复杂,没有得到充分的发展。70 年代后,计算机技术特别是微型机的发展和普及,随机控制和系统辨识等的成熟,使得对自适应控制的研究又活跃起来。数十年来,经国内外众多研究和应用人员的努力,已形成了较为完整的理论,并获得了许多成功的应用。从应用角度考察各种自适应系统,大体上可以归纳成两类:模型参考自适应控制和自校正控制。

模型参考自适应控制的基本思想是在控制器—控制对象组成的闭环回路外,再建立一个由参考模型和自适应机构组成的附加调节回路,如图 1.8 所示。设计的特点是:对系统性能指标的要求完全通过参考模型来表达,即参考模型的输出(状态)就是系统的理想输出(状态)。当运行过程中对象的参数或特性变化时,误差进入自适应机构,经过由自适应规律所决定的运算,产生适当的调整作用,改变控制器的参数,或者对控制对象产生等效的附加控制作用,力图使被控过程的动态特性(输出)与参考模型的一致。

图 1.8 模型参考自适应控制结构图

自校正控制的附加调节回路由辨识器和控制器设计组成,如图 1.9 所示。辨识器根

据对象的输入和输出信号在线估计对象的参数。以对象参数的估计值$\hat{\theta}$作为对象参数的真值θ,送入控制器设计机构,按设计好的控制规律进行计算,计算结果 v 送入可调控制器,形成新的控制输出,以补偿对象特性的变化。自校正控制在实际中得到了较多的应用,它的基本理论和设计方法在 5 .1 节中将详细介绍。

图 1 .9　自校正控制结构图

自适应控制是一种逐渐修正、渐近趋向期望性能的过程,适用于模型和干扰变化缓慢的情况。对于模型参数变化快,环境干扰强的工业场合,以及比较复杂的生产过程,显得力不从心,难于应用。

2 . 变结构控制

变结构控制由前苏联学者提出并进行了系统的研究,经过 30 多年的发展,已在理论上和应用中取得了许多成果[5][6]。变结构控制本质上是一类特殊的非线性控制,其非线性表现为控制的不连续性。这种控制策略与其他控制的不同之处在于系统的‘ 结构 ”并不固定,而是可以在动态过程中,根据系统当时的状态(如偏差及各阶导数等),以跃变的方式、有目的地不断变化,迫使系统按预定的‘ 滑动模态 ”的状态轨迹运动,如图 1 .10 所示。由于滑动模态可以进行设计且与控制对象参数及扰动无关,这就使得变结构控制具有快速响应、对参数及外扰变化不灵敏、无需系统在线辨识,物理实现简单等优点。它在非线性控制和数控机床、机器人等伺服系统以及电机转速控制等领域中获得了许多成功的应用。

图 1 .10　变结构控制原理示意图

变结构控制中的‘ 结构 ”并不是指系统的物理结构,而是系统在状态空间(相空间)中

的状态轨迹(相轨迹)的总体几何性质。变结构控制过程由两个阶段的运动组成。第一段是正常的运动(图 1 .10(b) *AB* 段),它全部位于切换面之外,或有限次穿过切换面。第二段是滑动模态(图 1 .10(b) *BO* 段),完全位于切换面上的滑动模区之内。过渡过程的品质决定于这两段运动的品质。每段品质均与所选的切换函数 $s(x)$及控制函数 $u^{+}(x)$及 $u^{-}(x)$有关。

变结构控制的问题是状态轨迹到达滑模平面后,难于严格沿着滑模面向平衡点滑动,而要在滑模面两侧来回穿越,产生颤动。变结构控制的设计也比较复杂。这些给它在应用中带来一些困难和障碍。

3 . 鲁棒控制

控制系统的鲁棒性是指系统的某种性能或某个指标在某种扰动下保持不变的程度(或对扰动不敏感的程度)。鲁棒性是一个统称,最基本的可分为稳定鲁棒性和品质鲁棒性,前者指系统在某种扰动下保持稳定性的能力,后者指保持某项品质指标的能力。

鲁棒控制是在 70 年代初针对模型的不确定性问题提出的。其基本思想是在设计中设法使系统对模型的变化不敏感。使控制系统在模型误差扰动下仍能保持稳定,品质也保持在工程所能接受的范围内。模型的不确定性包括了模型的不精确、降阶近似、非线性的线性化、参数和特性随时间的变化或漂移等。在鲁棒控制中,系统工作环境和外界扰动的变化也转化为一种模型的变化(摄动)来处理。由于所有的工业系统不可避免地存在各种不确定性,因此研究鲁棒性的问题对工业控制十分重要。一个控制系统是否具有鲁棒性,是它能否可靠地用于工业现场的关键。这也是鲁棒控制的研究长期以来经久不衰的原因。

目前,鲁棒控制主要有两类方法:

(1) 代数方法　研究对象是系统的状态矩阵或特征多项式,讨论多项式族或矩阵族的鲁棒控制。其中又包括多项式代数法和状态空间法。

(2) 频域方法　从系统的传递函数矩阵出发。H_∞是其中较为成熟和应用较广的方法。这类问题的实质是通过使系统由扰动至偏差的传递函数矩阵的 H_∞范数取极小,来设计出相应的控制规律。现代鲁棒控制采用了频率方法与状态空间结合,即直接在状态空间上进行设计。其设计过程简单,控制器阶次较低,结构特性明显。

鲁棒控制中的结构奇异值理论(μ 方法)也占有重要的地位。其基本思想是把系统的确定部分和摄动部分进行关联重构,以隔离所有摄动,转而处理对角有界摄动问题。μ 方法很好地补充了 H_∞控制的不足。

关于鲁棒控制的基本理论和设计方法,在第 4 章中具体介绍。

虽然鲁棒控制的理论研究十分热烈,也取得了一系列成果,但其应用却很不如人意。主要集中在飞行器、柔性结构、机器人上,工业过程控制领域比较少。在实际设计中,鲁棒区域或摄动区域必须已知且有限,且设计必须在系统的鲁棒性和控制的精确性之间折衷。缺乏良好的设计方法,设计出的的控制器可能高达数十阶,难于实现。这些都阻碍了它的广泛应用。鲁棒控制是工程应用远落后于理论研究的一个典型。但鲁棒控制的基本思想方法和一些成功应用实例,表明它有很高的应用价值,从而激励人们去不断完善其理论和

设计方法,促进其在工业中的广泛应用。

4. 预测控制

70 年代中期预测控制已经出现,这是一种基于模型又不过份依赖模型的控制策略。各种算法不下几十种,但都是建立在模型预测—滚动优化—反馈校正这三条基本原理之上。其基本思想类似于人的思维和决策,即根据头脑中对外部世界的了解,通过快速思维不断比较各种方案可能造成的后果,从中择优予以实施[7][8]。其原理如图 1.11 所示。

图 1.11　预测控制结构示意图

预测模型是系统动态特性的预先描述,它根据系统的历史信息和未来输入,预测未来一个有限时段的输出值。在线滚动优化是预测控制的核心,它保持了优化控制的原理,但不是进行全局的整体优化,而是随时间推移逐段优化。在每一时刻都提出一个立足于该时刻且仅涉及到预测时域的局部优化指标,进行反复在线优化。反馈校正是在控制的每一步,都检测实际输出并与基于模型的预测值进行比较,以此修正模型预测的不准确性,然后再进行新的优化。

这种"边走边看"的滚动优化控制策略可以随时顾及模型失配、时变、非线性或其他干扰因素等不确定性,及时进行弥补,减小偏差,获得较高的综合控制质量。预测控制集建模、优化、反馈于一体,三者滚动进行。其深刻的控制思想和优良的控制效果,一直为学术界和工业界所瞩目。现在,国外一些控制工程公司已开发出商品化的预测控制软件包,在各个工业部门,特别是大型工业过程控制中有成功的应用。

预测控制的缺点是在建模中未充分利用过程的知识,其计算耗时、工作量大。关于预测控制的基本理论和方法,将在第 3 章中介绍。

1.4　智能控制策略

80 年代以来,世界各国工业向着大型、连续、综合化发展,构成的控制系统也变得越来越复杂。其复杂性可归纳为:

(1) 对象复杂　不只是一种单一的运动,往往是几种物质的运动,甚至同时进行着物理、化学、生物的反应,内部机理不甚清楚;系统往往是非线性、多变量、强耦合和高维数的;对象的特性(包括结构、参数等)在变化,存在着许多不确定性因素,难以用常规的数学工具建模并进行研究;输入信息多样化、数据量庞大;信息方式不是单一的,往往是多媒体