

国家『九五』重点图书

现代控制理论的工程应用

曹永岩 毛维杰 孙优贤 冯 旭 著

现代控制工程丛书

内 容 提 要

本书从工程化、应用化的角度,结合作者自己的研究成果与经验,展示了现代控制理论中的各种高级控制策略,全书共分八章。第一章在总结了控制理论的发展概况及工业生产过程特点的基础上,概述了各种面向工业过程的现代控制策略。第二章至第八章,分别详细介绍了鲁棒控制、解耦控制、预测控制、多模型控制、容错控制、智能控制、推断控制的基本原理及设计方法。书中内容深入浅出,是一部实用的面向工程应用的现代控制理论专著。

本书可作为控制理论与控制工程及相关专业本科高年级和研究生的教材或参考书,并适用于自动控制领域的科技人员阅读。



前 言

随着现代科学技术与经济建设的蓬勃发展,工业过程的生产规模越来越大型化、复杂化,生产过程的连续性不断加强,设备的操作更加强化。为了保证生产过程的正常运行,降低能耗,增加产量,提高质量,获得最大的经济效益,必须提高工业过程的自动化水平。我们认为,先进的自动控制系统应该包括硬件和软件两方面的内容,即不仅要有先进的自动控制设备,还要有先进的自动控制策略。从硬件角度看,目前各工业领域已普遍从常规仪表过渡到以集散控制系统(DCS)与可编程控制器(PLC)为代表的新一代过程控制计算机系统,为实现各种复杂的控制策略提供了灵活、可靠和功能齐全的技术工具。因此,硬件已不再成为自动控制系统发展的直接障碍;相反,软件即先进的自动控制策略的欠缺,似乎正成为自动控制系统发展的瓶颈。

我们知道,现代控制理论在近几十年中得到较大的发展,其理论体系也非常完善。现代控制理论在不断揭示控制的本质规律的同时,还提供了适于不同场合与要求的新的强有力的设计方法,这是广大学者所公认的。然而,其理论体系是建立在精确的数学模型之上,而现实却恰恰是复杂的、不确定的,精确的数学模型难以得到。因此,其应用,尤其在工业生产中的应用困难重重。各种先进控制策略因此而产生,力图比较好地解决因工业生产过程的复杂性所带来的困难。本书是作者及其合作者长期研究工作的总结,从过程控制的实际出发,着重剖析了鲁棒控制、解耦控制、预测控制、多模型控制、容错控制、智能控制、推断控制等先进控制策略。

鲁棒控制就是在控制对象存在着明显的不确定性的条件下,设计一个确定的控制系统,使其能够在对象特性发生变化时能保证有良好的控制性能。一般来讲,鲁棒控制是一种在控制性能和鲁棒性之间进行谨慎而合理的折衷的设计方法。

解耦控制的思想,是先将多变量系统各变量之间的关联性消除或削弱,化为或近似地化为多个互不关联的子系统,然后利用单变量设计方法对各子系统进行单独设计。若所设计的解耦控制器对系统的不确定性具有良好的鲁棒性时,该控制器就是鲁棒解耦控制器。

预测控制是一类基于系统模型以预测系统输出从而决定其控制作用的计算机控制算法。由于它的产生和发展直接源于实际应用的需求,因此已在过程控制领域,特别是在化工过程控制中得到了相当广泛的推广。

在过程控制中,控制对象的不确定性还反映在工况和操作条件的变化。这种变化不是连续的,而是按确定的档次变化的。因此,我们可以按不同的工况和操作条件,建立不同的数学模型,然后根据多模型设计控制器,以达到一个控制目标的要求,这就是多模型控制的思想。

在多变量系统控制中,有一类特殊的问题,即由于某些执行器或传感器出现故障时,要求所设计的控制器仍能维持系统稳定,甚至保持一定的控制性能,这就是容错控制的思想。

智能控制通过在系统控制和决策中引入人工智能,实现对一些复杂的被控对象的有效控制。智能控制通常被概括为自动控制和人工智能的结合。智能控制目前尚未形成比较完整的

理论体系,但其覆盖的范畴已十分广泛,包括模糊控制、学习控制、专家控制、神经网络控制等。

推断控制则是针对在不可测扰动作用下,过程不可测输出变量的控制问题而发展起来的。其基本思想是,根据比较容易测量的过程辅助变量,来估计不可测扰动对过程主要输出变量的影响,并通过适当的控制方法克服这种影响。

本书从现代控制理论的高度,对上述各种先进控制策略进行了详细的分析和论证,主要从工程化、应用化的角度,展示上述一系列方法,对其理论体系不作过多的深入探讨。现代控制理论尽管已有完善的理论体系,形成了很多分支,但它在过程控制中的应用仍不容乐观。本书是对现代控制理论的工程应用研究与开发的一个探索。当然,要彻底解决这个问题,我们总感到有点力不从心,只是为了抛砖引玉,希望引起广大学者的重视。我们希望本书对深化我国在现代控制理论工程应用方面的研究会有所帮助,能起到参考与借鉴作用。

与本书有关的部分研究课题是与李平、夏启军、应依群、贾磊、陈苏平、罗小青、皮道映、张明君、唐晏等同志共同完成的。本书在各章引用了他们的博士论文和硕士论文的有关内容,因此他们既是作者相关研究工作的合作者,也是此书的贡献者。作者在进行与本书有关的研究工作中还得到浙江大学控制科学与工程学系有关教师的帮助,林庆女士在其中承担了大量的文字工作,在此一并表示衷心的感谢!

作 者

2000年3月

目 录

第一章 绪 论

1.1 控制理论的发展概况	1
1.2 工业生产过程的特点	2
1.3 工业过程的现代控制策略	5

第二章 鲁棒控制

2.1 概述	12
2.2 单变量 H_∞ 控制的工程设计方法	12
2.3 多变量 H_∞ 控制的工程设计方法	17
2.4 H_∞ 自校正控制	23
2.5 带 H_∞ 性能界的 LQG 控制	32
2.6 标称反馈矩阵的 H_∞ 优化: 同时含未建模动态和实参数不确定性的情形	41

第三章 解耦控制

3.1 概述	54
3.2 实例研究: 加压网前箱的解耦控制	54
3.3 稳定性解耦的充分条件	60
3.4 局部解耦输入输出变量的优化配置	62
3.5 多变量双线性系统的输入—输出解耦线性化	66
3.6 鲁棒解耦理论	72

第四章 预测控制

4.1 概述	96
4.2 典型的预测控制方法	96
4.3 广义预测控制基本原理及扩展	102
4.4 内模原理在预测控制中的应用	108
4.5 分散前馈解耦的 MAC 控制	114
4.6 时滞过程的鲁棒 Smith 预估控制	120

第五章 多模型控制

5.1 概述	146
5.2 基于预测的多模型模糊加权控制	146
5.3 同时镇定控制器的参数化	157

5.4	同时镇定问题的状态空间解释	161
5.5	强镇定与同时镇定:状态空间分析	165
5.6	同时镇定控制器设计方法初探	168
5.7	一种单输入系统同时镇定控制器的设计方法	171
5.8	严格正则多输入多输出对象同时镇定	178
5.9	奇异系统的最优同时镇定——梯度流方法	184
5.10	同时镇定控制器设计——频率方法及在纸机上的应用	198
 第六章 容错控制		
6.1	概述	206
6.2	具有完整性的控制系统综合	209
6.3	控制系统的故障检测和诊断	226
6.4	控制系统故障的补偿	247
6.5	造纸机故障的检测与诊断	263
6.6	水位控制装置的容错控制	267
 第七章 智能控制		
7.1	概述	270
7.2	模糊理论的基本概念	270
7.3	最优模糊控制	273
7.4	精确—模糊集成控制	278
7.5	基于模糊规则的学习控制	289
7.6	实时专家控制	301
7.7	基于知识的学习控制	313
 第八章 推断控制		
8.1	概述	323
8.2	典型推断控制方法	323
8.3	基于软测量的低定量纸机推断控制	328
8.4	输出可测的中定量纸机推断控制	332
参考文献		335

第一章 绪 论

随着现代科学技术的蓬勃发展,炼油、化工、冶金、电力等工业过程的生产规模越来越大、复杂化,生产过程的连续性不断加强,设备的操作更加强化。为了保证生产过程的正常运行,降低能耗,增加产量,提高质量,获得最大的经济效益,必须提高工业过程的自动化水平,仅仅依靠常规控制方法不能满足现代工业生产的要求。例如,在催化裂化中的反应温度控制、反应深度控制、再生烧焦控制、两器压力平衡协调控制、分馏塔产品质量控制等等,这类被控对象存在大的时间滞后、多变量交互耦合、高度非线性、不可测变量干扰以及苛刻的变量约束等,传统的控制方法显然力不从心,迫切需要开发和研究新型的适用于工业过程特点的过程控制理论和方法。计算机技术的突飞猛进,深刻地影响了工业过程控制的发展方向,尤其是以集散控制系统(DCS)为代表的新一代过程控制计算机系统的出现,为实现各种复杂的控制策略提供了灵活、可靠和功能齐全的技术工具,使工业过程控制的理论和实践在近 20 年取得了重大的进展。

1.1 控制理论的发展概况

控制理论与其他任何学科一样,都源于社会实践和科学实验。它的形成和发展与社会生产力的发展密切相关,相互依存并相互促进。在人类社会早期实践活动中,虽然也使用了一些简单的“前馈”和“反馈”思想,但还相当稀少和原始。蒸汽机的出现,极大地刺激了反馈控制技术的发展,使控制理论真正走上了系统研究之路。

在 19 世纪,为了解决蒸气机离心调速器的控制精度和系统稳定性之间的矛盾,Maxwell 1868 年提出了用基本系统的微分方程模型分析反馈系统的数学方法。同一时期,Vyshnegradskii 阐述了调节器的数学理论。在 1895 年,Roth 和 Hurwitz 分别提出了基于特征根和行列式的稳定性代数判别方法。进入本世纪后,电信事业的发展导致了 Nyquist 频率域分析技术和稳定判据的产生。Bode 进一步研究开发了易于实际应用的 Bode 图。1948 年,Evans 提出了一种易于工程应用的求解闭环特征方程根的简单图解方法——根轨迹分析法。至此,自动控制技术开始形成一套完整的、以传递函数为基础、在频率域对 SISO 控制系统进行分析与设计的理论,这就是今天所谓的经典控制理论。经典控制理论最辉煌的成果之一要首推 PID 控制规律。PID 控制原理简单,易于实现,对于无时间延迟的单回路控制系统极为有效。直到目前,在工业过程控制中仍然被广泛应用。

本世纪 50 年代后期,空间技术的发展和计算机的普及对控制理论的发展产生了深刻的影响,这种影响促进了控制理论由经典控制理论向现代控制理论的转变。随着生产过程迅速向着大型化、连续化的方向发展,被控对象渐趋复杂,对系统的控制要求也变得越来越高的,如航天飞机的准确接轨控制,简单的反馈已无法满足解决不确定性问题的需要,更为精巧的控制器设计方法应运而生,其中最具代表性的就是基于模型的现代控制理论。现代控制理论以 Pontragin 的极大值原理、Bellman 的动态规划和 Kalman 的滤波理论为其发展里程碑,揭示了一些极为深刻的理论结果。现代控制理论基于时域内的状态空间分析方法,着重实现系统的最优控制研究。这种方法把系统描述为四个具有适当阶次的矩阵,不少控制问题就归结为这几个矩阵或它

们所代表的映射应具有的要求和满足的关系,这样控制系统的一些问题经过转化就成为比较纯化的数学问题,特别是线性代数问题。

状态空间方法的应用使我们对控制领域里的一些重要问题的认识更加深化。由于这种方法使得人们第一次能够比较容易地解决线性多变量问题,并提供了一种将线性定常系统中的结果推广到其外的方便的手段,人们对这种技术在工业实际中的应用寄予了很高的期望。的确,自从现代控制理论形成以来,它在空间、军事技术上获得了许多成功的应用。遗憾的是,现代控制理论在工业实践中遇到了理论、经济和技术方面的一些困难。造成这种状况的原因比较复杂。从外部来看,与空间技术不同,工业过程要求控制器的结构尽可能简单,成本尽可能低,采用最优性能指标设计出来的控制器结构比较复杂;在空间技术中,对性能指标的要求则比较单一。各种工业控制对象对技术性能的要求很难用误差平方和 ISE(Integral Square Error)这样一个单一的模式加以概括。虽然我们可以通过对 ISE 加权或对控制变量惩罚的办法来缓和这种矛盾,但是由于加权项或惩罚项又要依赖于经验进行反复的试凑,因此最优控制综合方法的优点也就被抵消了。从内部来看,首先,状态空间方法把整个控制系统分割成相对独立的状态来分析,因而很难直观判断出各个“孤立”的状态对整个系统的影响程度;其次,它从闭环状态来列写控制系统的四个矩阵,控制系统开环频率特性所带来的优点都由于分割而湮没了。这个问题导致的直接结果是,在已建立起来的技术与新的理论之间存在一条裂痕,使依赖于物理洞察力进行设计的工程师难以接受这种方法;更为严重的是在过去的二三十年里,这种理论对于反馈控制的某些中心问题缺乏基本的阐述,譬如干扰工业过程控制的模型不确定性。因此从工业控制实践的观点来看,以状态空间分析方法为基本特征的现代控制理论还存在许多局限。

1.2 工业生产过程的特点

众多的工业生产过程往往各自都具有其本身的特殊性,在某一工业过程中成功的控制结构和策略在别的工业过程中很可能不能使用,从而形成了过程控制的多样性。因此,对于过程控制系统的设计,仅仅采用控制理论中已提出的现成方法是不够的,还必须针对工业过程的特殊性和不同要求,开发不同的过程控制系统结构。一般来讲,工业过程均具有以下特征。

1. 对象的不确定性

众所周知,一般的工业现场均存在多种多样的干扰,许多干扰不仅严重而且机理复杂。不仅如此,大多数干扰既无法测量,又无法消除。一般来说,不确定性的来源可分为两类:不可预知输入和不可预知动态。不可预知输入是指那些除已知的输入外,还对其输出产生影响,且在重复实验时无法复制的激励。不可预知动态则意味着不同的输入只能激发出系统的不同侧面的动态,这样,即使在没有不可预知输入存在并已知某一输入对应的输出时,一旦改变激励,其输出还是无法预知的。显然,这两类不确定性是普遍存在的。

控制设计所基于的数学模型一般也仅是被控对象的简单近似,一般都忽略掉了许多复杂的干扰因素。而且,人类的认识水平有限,工业过程中经常发生的物理变化和化学变化使人们无法确切了解过程的本质特征。比如造纸过程,白水的浓度、纸机的车速、压辊的线压、铜网的老化、毛毯的磨损等这些慢时变特性都会使得在造纸过程模型中存在各种各样的不确定性。空气的温度和湿度的变化,纸浆打浆度和湿重的变化,会引起造纸过程模型结构的摄动和参数的

摄动;纸种规格型号的改变(如书写纸有 60 克/米²、70 克/米²、80 克/米² 等),也会导致操作条件的变化,而操作条件的变化又会造成造纸过程控制对象特性的变化;传感器和执行器的特性漂移和失效,显而易见会造成被控过程广义对象特性的改变。此外,许多工业过程的某些局部具有严重的非线性,在外界扰动作用下,其操作点可能会产生移动,对象特性也因而发生变化。

2. 状态的不完全性

一般的工业过程都有不少状态变量和扰动变量无法直接测得,这样就无法实现各种形式的状态反馈控制,也无法实现前馈补偿的各种控制。比如在纸机抄造过程中,存浆池的打浆度和湿重、白水的浓度、网前箱纸浆的浓度、填料的浓度、胶液的浓度、施胶前纸页的定量和水分,对成纸的定量和水分都有明显的影响,但却无法直接测量。纸浆的质量主要取决于打浆的质量,如果纸浆的打浆度、湿重和浓度不合格,造纸机就不可能生产出合格的纸张,可见纸浆的打浆度、湿重和浓度对成纸定量和水分的影响极大。此外,白水的浓度和网前箱纸浆的浓度很低,分别为 0.085%~0.15% 和 0.65%~0.35%,对于这样低的浓度,目前还没有在线测量仪表,但白水的浓度和网前箱纸浆的浓度对成纸定量有着至关重要的影响。同时,填料的浓度和胶液的浓度波动会直接引起定量的变化。最后施胶前纸页的定量和水分,是成纸定量和水分的导前信号,如果能够对此进行测量和控制,对于减小定量和水分的偏差,节约纸浆和节省蒸气,具有十分重要的意义。遗憾的是人们至今无法对它们进行直测,这无疑给纸机过程控制带来了不少麻烦。

3. 多变量和强耦合特性

几乎在所有的工业过程中,都包含了较多的过程变量,而且过程变量之间相互关联很严重,任何一个变量的变化常常都可能引起其他所有变量发生变化,尤其是设备之间的物流循环使问题更加复杂。例如,催化裂化过程涉及到几百个乃至上千个变量,每个变量的变化均会不同程度地影响整个装置的运行状况,各种物流的循环使得催化裂化工业流程错综复杂。

又如,造纸过程也是一个复杂的多变量过程,变量与变量之间相互关联、相互耦合。从整机控制的角度看,成纸定量由浆门控制,成纸水分由蒸气阀门控制,但当成纸定量提量或降量时,成纸水分也会相应的增加或减少,反之亦然。对于精密纸机的网前箱,由浆门控制纸浆浓度,由蒸气阀门控制纸浆温度,由白水阀门控制网前箱液位,它们之间也是相互关联的。当网前箱纸浆浓度改变时,网前箱液位和纸浆温度都会随之引起变化。对于高速纸机的封闭式网前箱,总压、液位和上部空间压力,分别由纸浆流量、白水流量和压缩空气量来控制,它们是严重相关的,网前箱液位升高或降低,总压和上部空间压力都会相应变化。由于上述各变量间的耦合都是强耦合,这样就增加了造纸过程控制的困难程度和复杂程度。

4. 对象的大纯滞后特性

工业装置尺寸大,容量滞后和传输延时是不可避免的。在石油化工和冶金工业等工业过程中,直径达三四米,长度或高度超过几十米的设备到处可见,几十分钟的纯滞后现象也不算稀奇。对于生产高定量纸的纸机,由于流量长、纸张厚、烘缸多、车速慢,纯滞后时间特长,一般在 5 分钟至 10 分钟的数量级,而对于高速纸机,纯滞后时间极小,一般只有几秒至几十秒。而且,造纸过程控制系统是一个时滞不平衡的系统,定量回路和水分回路的纯滞后时间一般不相等,

有的相差极大,这对造纸过程控制系统的设计与综合是一个令人头痛的问题。

5. 对象的非线性特性

严格地讲,所有的工业过程都存在非线性,只是非线性的程度不同而已。对于非线性程度较弱的系统,在一定的范围内可以当作线性系统来处理。对于非线性程度较强的系统,采用线性化的处理方法时常会产生很大的偏差,甚至会得出完全相反的结论。虽然大部分工业过程的正常生产是处于某一稳态工作点,但由于原料性质的变化以及对目的产品的不同要求,人们必须改变过程的操作点,以满足新的生产条件,而不同操作点引起的过程动态特性的差异在事实上也形成了工业过程的非线性行为。比如,造纸过程具有非线性,在某些局部非线性还十分严重。在网前部,等效网前箱的液位与出口纸浆流量呈二次方关系;在铜网部,案辊脱水方程和真空箱脱水方程都是指数关系;在压榨部,几道压榨的脱水方程同样是指数关系;在烘干部,传质、传热方程是高次方的非线性方程;从烘缸内蒸气冷凝,产生冷凝潜热传递给烘缸表面,由烘缸表面经纸页传递给毛毯,最后由毛毯传递至大气,每一个传递过程都是非线性方程。

6. 动态响应缓慢

大部分工业过程对操作变量的响应十分迟钝,当过程对操作点的偏差稍大时,需要较长的时间才能使过程平稳下来。装置和设备的大型化是重要的原因之一。

7. 约束多样且严格

大部分控制问题都可归结为在系统不确定和约束下获取满意的性能。可以说,约束无处不在,有系统和驱动器本身的客观限制带来的客观约束,还有出于安全考虑和设计需要而带来的人为约束。输入饱和是最为常见的输入约束,也就是说控制幅度有限制。另一种输入约束是对控制增量的限制,这类约束或者是由于控制器件自身的限制,或者是出于对器件的安全保护。输入约束还来自系统建模和控制设计,通常的线性系统仅是对系统进行合理的线性化得到的,该线性化仅在一定区域内有效,为了保证控制设计所采用的模型的可靠性,只有通过规定输入在一定界内来实现。在过程中还有一些没有直接进行控制,然而必须保持在规定界内的所谓相关变量,对相关变量的约束实际上也是加在系统上的约束。

工业生产中各种设备对温度、压力等的承受力是非常苛刻的硬约束,还有由于操作安全性、工艺要求以及经济性引起的各种软约束,都是过程控制必须满足的约束条件。

8. 其他特性

很多工业过程还具有以下的一些特性:时变性,如焦化过程中的参数、催化反应中的触媒活性变化等;间歇性,如间歇式反应器、转炉炼钢等;分布参数,如加热炉、陶瓷烧结过程各燃烧室温度参数等都是典型的分布参数系统;高维性,如精馏塔、炼钢高炉等都具有很高的维数;大规模和多层次,对于这样的系统如何选择其合理的性能指标和相应的控制策略,至今仍然是过程控制工作者探索的课题。

由此可见,工业生产过程的特性是非常复杂的,因而对其实施控制就显得非常困难。为了把过程控制提高到一个新的水平,必须有足够数量的受过严格训练的和具有扎实基础的科学

技术复合型人才,以真正的工业过程为研究对象,在过程实践中逐步探索和建立一门更适合工业过程控制特点的新理论,才能从根本上改变目前这种令人遗憾的局面。

1.3 工业过程的现代控制策略

在 60 年代末以前,主要采用 PID 控制策略,尽管其算法简单,鲁棒性能也较好,但是在处理具有时变、大时滞、非线性等特性的过程时,就显得力不从心。基于状态空间模型的现代控制理论尽管发展很快,在空间技术和军事工程上获得了成功的应用,但面对如此复杂并难于建模的工业过程,依然存在着很大的局限性。同时,由于现代控制技术应用与工业过程涉及到一系列的学科,如计算机技术、管理技术、系统工程和过程本身的工艺及其机理等等,使过程控制的研究在一定程度上受到了严重的制约。因而,自 70 年代以来,陆续出现了自适应控制、预测控制、鲁棒控制、智能控制、非线性控制等控制策略,力图比较好地解决因工业生产过程的复杂性所带来的困难。

1.3.1 自适应控制

最早提出自适应控制思想的是美国麻省理工学院的 Whitaker 教授。1958 年,他设计了一种参考模型自适应控制方案,用于解决飞机在不同飞行高度所遇到的环境参数不一致的问题。但是,当时受限于计算机技术和控制理论的发展水平,这些新的控制思想没有得到应用普及与推广。经过几十年的摸索与研究以及计算机技术的迅猛发展,70 年代和 80 年代,形成了研究自适应控制的热潮。发展到现阶段,无论从理论研究还是从实际应用的角度看,自适应控制大致可分为两大类,即采用模型跟踪方式的模型参考自适应系统和系统辨识与最优控制相结合的自适应系统。

1. 模型参考自适应控制系统

模型参考自适应控制系统框图如图 1.3.1 所示。

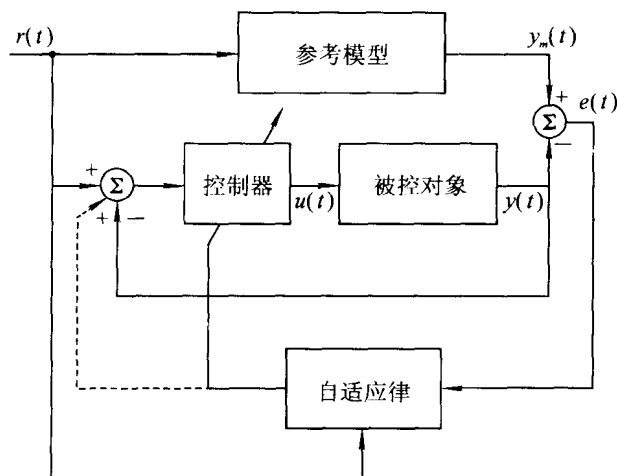


图 1.3.1 模型参考自适应控制系统的结构图

它一般由下面几部分组成:参考模型,被控对象,常规反馈控制器和自适应控制回路(自适应律)。这类自适应控制系统实际上是在原来反馈控制系统的基础上再附加一个参考模型和一个控制器参数的自动调节回路。参考模型的输出直接表达对系统的性能要求。自适应律调节控制器参数,使被控过程的输出尽快跟踪用参考模型表达的期望输出。设计这类自适应控制系统的核心问题是如何综合自适应律。关于自适应律的设计目前存在着两类不同的方法,一种称为参数最优化的方法,即利用最优化方法搜索到控制器的参数,使某个预定的性能指标(例如 $J = \int e^2 dt$) 达到最小;另一种设计方法是基于稳定性理论的设计方法,其基本思想是保证控制器参数的自适应调整过程是稳定的,然后再使这个调整过程尽可能收敛得快一些。由于自适应控制系统一般是本质非线性的,因此,李亚普诺夫稳定理论与波波夫超稳定理论都是设计自适应控制系统的有效工具。由于保证系统稳定是系统设计最基本的要求,所以基于稳定性理论的设计方法是大多数学者所采取的方法。

模型参考自适应控制器的主要缺点是没有一个通用的计算程序,对不同的系统需寻找不同的稳定条件。若用李亚普诺夫方法,对不同的系统寻找不同的李亚普诺夫函数决不是一件容易的事情。在稳定性与最优性之间不易寻找良好的统一,且设计过程较为繁杂。

2. 系统辨识与最优控制结合的自适应系统

这类自适应控制系统的框图如图 1.3.2 所示。它一般由系统辨识、被控对象、最优计算和调节器几部分组成。

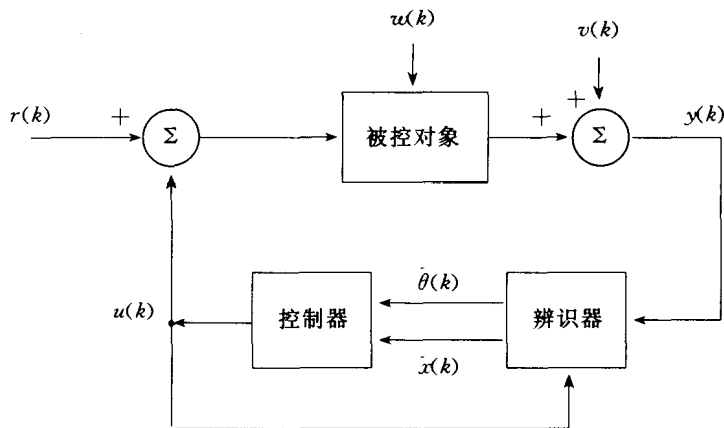


图1.3.2 具有在线辨识的自适应控制系统

这类自适应系统的一个主要特点是具有被控对象数学模型的在线辨识环节。根据系统和运行数据,首先对被控对象进行在线辨识,然后再根据辨识得来的模型参数和预先指定的性能指标在线地综合控制作用。通常,这类系统在设计辨识算法和控制算法时,考虑了随机扰动和测量噪声的影响,所以应该属于随机自适应控制系统这一类。

事实上,这类算法最为关键的问题是如何能实时地正确辨识对象数学模型的参数。首先要确保输入必须是持续激励的,即能不断地将对象固有特性激发出来;其次是要确保被辨识的参数能收敛到真值。遗憾的是这两方面的工作由于工业过程的复杂性至今做得并不完善,从而影响了在工业过程控制中大范围的推广使用。尽管如此,到目前为止,仍有大量有关成功应用的

报道,在此不再赘述。

这类算法比较典型的有自校正调节器(STC)、广义最小方差控制器(GMC)、极点配置控制器、自校正 PID 控制器等等。

1.3.2 预测控制

预测控制,也称为基于模型的控制(Model-Based Control),是 70 年代末兴起的一类新型计算机控制算法,最典型的算法为 DMC、MAC、GPC 等。

一般认为,预测模型、滚动优化、反馈校正是预测控制的三个本质特征。以下就这三个方面所包含的方法原理来说明预测控制对于复杂系统的适应性。

1. 预测模型

在预测控制算法中,需要一个描述对象动态行为的基础模型,称为预测模型。预测控制称为基于模型的控制,其意义即在于此。预测模型应具有预测的功能,即能够根据系统的历史信息 and 选定的未来输入预测出未来的输出值。作为产生于工业过程的某些早期预测控制算法如 MAC、DMC 等,为了克服建模的困难,选择了实际工业过程中较易测量的脉冲或阶跃响应作为预测模型,但不能认为预测模型仅限于这种形式。从方法论的角度讲,只要是具有预测功能的信息集合,不论其有什么样的表现形式,均可作为预测模型。在这里,强调的只是模型的功能,而不是其结构形式。因此,预测控制打破了传统控制中对模型结构的严格要求,更着眼于在信息的基础上根据功能要求按最方便的途径建立模型。

2. 滚动优化

预测控制是一种优化控制算法,但它与通常的离散最优控制算法不同,不是采用一个不变的全局优化目标,而是采用滚动式的有限时域优化策略。这意味着优化过程不是一次离线进行,而是反复在线进行的。这种有限优化目标的局部性,使其在理想的情况下只能得到局部的次优解,但其滚动实施,却能顾及由于模型失配、时变、干扰等引起的不确定性,及时进行弥补,始终把新的优化建立在实际的基础上,使控制保持实际上的最优。这种启发式的滚动优化策略,兼顾了对未来充分长时间内的理想优化和实际存在的不确定性的影响,是最优控制对于对象的环境不确定性的妥协。在复杂的工业环境中,要比建立在理想条件下的最优控制更加实际和有效。

3. 反馈校正

所有的预测控制算法在进行滚动优化时,都强调了优化的基点应与系统实际一致。这意味着在控制的每一步,都要检测实际输出信息,并通过引入误差预测模型或模型辨识对未来作出较准确的预测。这种反馈校正的必要性在于:作为基础的预测模型,只是对象动态特性的粗略描述,由于实际系统中存在的非线性、时变、模型失配、干扰等因素,基于不变模型的预测不可能和实际完全相同,这就需用附加的预测手段补充预测的不足,或者对基础模型进行在线修正。滚动优化只有建立在反馈校正的基础上,才能体现其优越性。这种利用实际信息对模型预测的修正,是克服系统中所存在的不确定性的有效手段。

综上所述,预测控制的三个基本特征是一般控制论中模型、控制、反馈概念的具体体现。预测控制的预测和优化模式是对传统最优控制的修正,它使模型简化,并考虑了不确定性及其复杂性的影响,因而更加贴近复杂系统控制的实际要求,这是预测控制在复杂系统领域中受到重视和应用的根本原因。

当然,预测控制也有它的不足,一是理论研究至今仍十分薄弱,这主要是由于预测控制的设计参数通常是以蕴含方式出现在闭环系统中,而优化指标又是滚动的,从而使一般的理论分析难以进行,导致控制器参数与系统性能(像鲁棒性、最优性能指标)之间的定量关系很难找到,而需要确定的控制器参数又很多。例如在 DMC 中,最优化时域长度、控制时域长度、误差权重矩阵、控制权矩阵、误差校正矢量等等都需要确定,因而给实施控制带来一定的困难,但这些困难并不会阻止预测控制在工业过程控制中的应用。近几年,预测控制在蒸馏塔、分离塔、多效蒸发器、锅炉、预热炉、造纸等领域获得了许多成功的应用。可以预见,随着对预测控制不断地深入研究,预测控制在工业过程控制中必有非常光明的前景。

1.3.3 鲁棒控制

目前,有关鲁棒控制的设计方法很多,要找出一个确切的定义比较困难。不过一般来讲,凡具有鲁棒性的控制系统均可称为鲁棒控制器,而鲁棒性通常是指数学模型与实际过程出现失配时,能使系统性保持在允许范围内的能力。据此,不同的控制性能(如稳定性、最优性等)都有自己相应的鲁棒性,对稳定性称之为鲁棒稳定性,对最优性称之为鲁棒性能等等。一般来讲,鲁棒控制是一种以性能指标的衰减来换取鲁棒性的设计方法。

现代鲁棒控制在很大程度上归功于以下三篇重要论文。第一篇是 Zames 在 1963 年发表的,建立了小增益原理,这一原理在鲁棒稳定性分析中起了重要的作用;第二篇是 Kalman 于 1964 年发表的,证明了单输入单输出系统最优 LQ 状态反馈控制律具有很强的鲁棒性能,即无穷大增益和 60° 相位裕量;另一篇是 Zames 在 1981 年发表的,在这篇文献里提出了控制系统的 H_∞ 设计方法。考虑到 H_∞ 设计方法在鲁棒控制中的重要作用,下面对此作一较为详细的介绍。

Zames 认为,基于状态空间模型的 LQG 设计方法之所以鲁棒性不好,主要是由于 LQG 使用的积分指标造成的。另外,用白噪声模型表示为确定的干扰也是不现实的,因此,在假定属于某一已知信号集的情况下,Zames 提出用其相应的灵敏度函数的 H_∞ 范数作为指标,设计目标是在可能发生的最坏干扰下使系统的误差在这种范数意义上达到最小,从而将抗干扰问题化为求解使闭环系统稳定以及相应的 H_∞ 范数指标极小化的输出反馈控制器问题。

考虑标量形式, H_∞ 空间是由所有在右半开平面解析且有界的复变量 s 的复值函数 $F(s)$ 全体组成的。对于 $F(s) \in H_\infty$,其中 H_∞ 范数定义为

$$\|F\|_\infty = \sup\{|F(s)|; \operatorname{Re}s > 0\}$$

H_∞ 空间中的所有实有理函数构成 H_∞ 的一个子集,记为 RH_∞ 。对于 $F(s) \in RH_\infty$,有

$$\|F\|_\infty = \sup\{|F(j\omega)|; \omega \in R\}$$

由此看出,如果使系统的干扰到误差的传递函数的 H_∞ 范数为最小,则具有有限功率谱的干扰对系统误差的影响将会降到最低程度。

H_∞ 设计方法的有效性可由下述鲁棒稳定性问题得到肯定。考虑图 1.3.3 所示系统,设 P , ΔP 和 K 均为实有理函数,且 P , ΔP 严格正则, K 正则,并假设 $\Delta P=0$ 时,系统内部是稳定的。

通过简单的方框图变换即可得图 1.3.4, 由熟知的 Nyquist 稳定性判据知, 若有

$$\|\Delta P K(1-PK)^{-1}\|_{\infty} < 1$$

则系统内部是稳定的。若存在 $r \in RH_{\infty}$ 使得

$$|\Delta P(j\omega)| < |r(j\omega)|, 0 \leq \omega \leq \infty$$

则系统内部稳定的一个充分条件是

$$\|rK(1-PK)^{-1}\|_{\infty} \leq 1$$

亦即加权闭环传递函数的 H_{∞} 范数小于某一给定数值就足以保证系统的鲁棒稳定性。

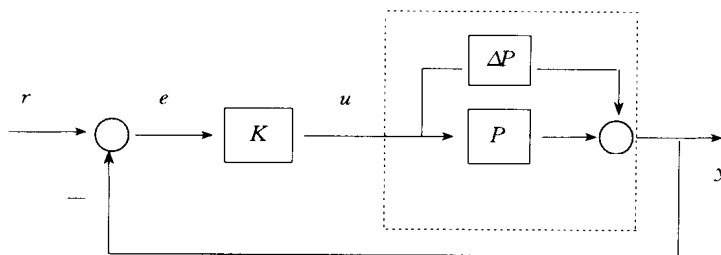


图1.3.3 鲁棒控制系统

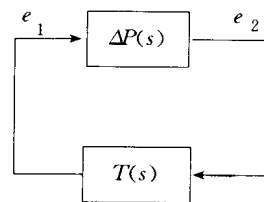


图1.3.4 等价系统

经研究发现,已有的几类系统设计问题(如模型匹配、跟踪、鲁棒稳定性、加权灵敏度等)均可归结为具有同一模式的 H_{∞} 标准问题。

在过去的十余年里, H_{∞} 控制理论将复杂的数学理论与实际的工程问题结合起来,取得了令人瞩目的进展,并已被尝试应用于交流调速、柔性臂以及空间飞行器的姿态控制中,其有效性也得到了越来越多的证实。1989年, Morari 等将 H_{∞} 设计引入到内模控制器(IMC)的计算上,得到了一些相当简单的结论,为 H_{∞} 控制理论在工程实际中的应用开辟了一条新路。

然而, H_{∞} 方法也存在一些问题,如计算步骤烦琐,得到的控制器阶次太高,控制器不稳定等,这些都导致了其很难在工业控制中得到成功和推广。

1.3.4 智能控制

科学技术的快速发展和巨大进步对系统和控制科学提出了新的更高的要求。自动控制科学正面临新的挑战。传统的反馈控制、现代控制理论和大系统理论等在应用中遇到了不少难题,影响到它们的推广应用。首先,这些控制系统的设计和分析都是建立在精确的系统数学模型的基础上的,而实际系统由于存在非线性、不确定性、时变性和不完全性等因素,一般无法获得精确的系统数学模型;其次,研究这些系统时,必须提出一些比较苛刻的假设,而这些假设在应用中往往与实际不相吻合;再次,为了提高控制性能,整个控制系统变得较为复杂,增加了设备的初投资,降低了系统的可靠性。因此,多年来,自动控制一直在寻找它的出路,而现在的一条出路就是实现控制系统的智能化,或采用传统的和智能的混合控制方式,以期解决上述问题。

智能控制一般被认为是人工智能与自动控制的交叉。

1979年, Saridis 提出的分级递阶智能控制是当今智能控制的重要流派之一。他把学习、识别和控制相结合,并遵循“智能递增,精度递减”的原则,其一般结构如图 1.3.5 所示。控制系统按智能程度的高低分为以下三级:

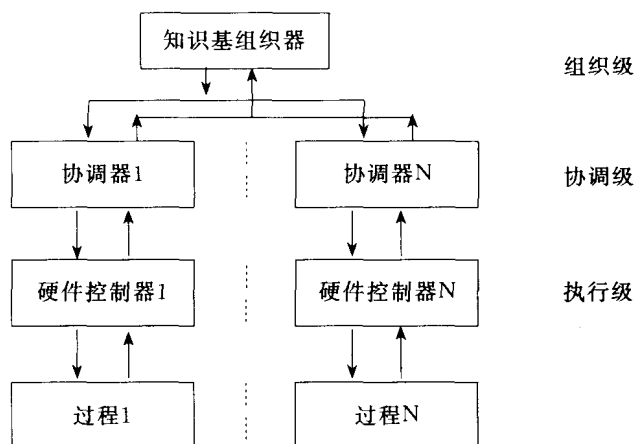


图1.3.5 分级智能控制系统

(1)硬件控制级。这一级是递阶智能控制系统的最低级,其控制目标是执行高精度的局部控制任务,以实现选定的局部性能指标为最优。

(2)任务协调级。这一级主要用于硬件控制级各局部子任务的协调,通常可由一系列协调决策自动机组成,在性能库及某些学习算法的支持下,该级给出相应的协调决策,以逐渐获得操作过程的最小成本。

(3)组织级。这一级是递阶智能控制系统的最高级,是整个控制系统的指挥者与组织者。它应具有较高的智能,较强的决策、识别和学习能力,以完成对一系列随机输入语言指令的解释,系统总体任务的组织,总体任务的分解,识别系统所得的控制情况。根据语言指令及过程反馈信息提出适当的控制模式等一系列任务,通常是采用语句制导的翻译机和决策机来实现。

70年代后期,受专家系统迅速发展的影响,人们对基于专家系统设计方法的智能控制——专家控制的研究逐渐活跃起来。在控制理论的实践中,人们认识到对于许多实际问题,由于过程的非线性、不确定性等复杂因素,难以采用数学解析的方法来进行系统的建模、分析、综合,而在这种情况下,由直观的过程行为知识即启发式知识来进行控制,往往是行之有效的。这就引起人们对专家控制的极大兴趣。人工智能中的产生式系统为描述这些信息处理和控制决策提供了一个有效的工具。专家控制的基本思想是把一个系统的输入和输出都形式化,把该系统专家的经验、技巧、操作思想知识化,然后模仿专家的行为实现对系统的控制。

1986年,Astrom等人提出典型的基于规则的专家系统,用来作为实行专家系统的核心。其核心由4个基本要素组成:系统数据库、推理机、用户接口,同时还设计了一个自适应调节器。调节器由以下三个平行的部分组成:规则基专家系统、算法库(包括控制算法、辨识算法和监督算法)、人机通讯。该控制方案将传递的控制算法与专家系统技术有机地结合起来,将数值计算和符号处理有机地结合起来,能根据过程的特性变化自动选择合适的控制规律,调整控制器的参数,因而被认为可用来有效地对复杂系统进行控制。

自从1965年Zadeh创建模糊集合论以来,模糊数学正以它前所未有的速度迅速成长,形成了一系列的基础理论,如模糊集合、模糊关系、模糊变换、模糊图论、模糊语言、模糊逻辑等。由于人们的一些高级智能,如学习、识别、分类、推理、诊断、控制等,都具有一个显著的特点:模糊性,因而模糊数学便自然地成为研究智能科学的一个有力工具,在人工智能中获得了广泛的

应用。同样,基于模糊数学而发展起来的模糊控制也受到了自动控制界的广泛重视,已成为智能控制的重要分支之一。

模糊控制策略主要来自于过程操作员的经验,并把它归结为一系列的模糊规则,利用模糊关系、模糊推理获得控制决策。有关详细论述可参看本书后续章节。

80年代初期,美国科学家 Hopfield 首先提出了人工神经网络(ANN)的概念,在研究了大脑神经的某些重要生理特征及结构之后,给出了神经网络模型及其能量函数,在该领域的研究中,做了许多开创性的工作。之后,特别是在近十年来,在世界范围内,掀起了研究神经网络的热潮。在自动控制、模式识别、故障诊断、图像处理、优化计算等诸多领域中,取得了很大的进展。尽管基于神经元的控制能力还比较有限,但是由于神经网络控制器具有学习能力和记忆能力、概括能力、并行处理能力、容错能力和适于用 VLSI 制造等重要特性,仍然有很多基于 ANN 的控制器被提出来。这类控制器称为神经控制器(Neural Controllers)。神经控制器具有并行处理、执行速度快、鲁棒性好、自适应性强和适于应用等优点,因而具有广泛的应用前景。