

现代控制工程丛书

智能预测控制及其应用

诸 静 等著

浙江大学出版社

智能预测控制及其应用

诸 静 等著

浙 江 大 学 出 版 社

内容简介

当前,预测控制研究已经拓展到“智能预测控制”理论及其应用机理研究的新领域,并将成为多变量复杂系统中深受众多学者关注并广泛应用、实效显著的一类新型控制策略。

本书为国家“九五”重点图书《现代控制工程丛书》的一个分册,主要内容有:模型预测控制基础理论,复杂系统模糊预测控制,基于人工神经网络的智能预测控制,非线性预测控制,新型预测控制(包括预测函数控制,多速率采样和多模型切换预测控制等基本理论、应用机理和实例仿真等)及智能预测控制的应用研究。原理部分阐述条理清楚,通俗易懂;应用实例和仿真研究面广、量多,说明翔实,并力求由浅入深。

本书读者以控制理论和控制工程及工业自动化领域的工程技术人员、科研工作者为主,也可作为高等院校教师、研究生、高年级本科生的教学与参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

智能预测控制及其应用/诸静等著. —杭州:浙江大学出版社,2000.12
(现代控制工程丛书)
ISBN 7-308-02633-7

I. 智... II. 诸... III. 知识控制 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 87331 号

责任编辑 王大根

出版发行 浙江大学出版社

(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)

(E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排版 浙江大学出版社电脑排版中心

印刷 浙江大学印刷厂

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 16.5

字数 423 千

版印次 2002 年 4 月第 1 版 2002 年 4 月第 1 次印刷

印数 0001—1000

书号 ISBN 7-308-02633-7/TP·205

定价 35.00 元

前 言

预测控制是 20 世纪 70 年代中后期在欧美工业领域内出现的,它是在新型计算机控制算法基础上发展起来的,是一种基于模型的先进控制技术,亦称为模型预测控制(MPC—model predictive control).它的主要特点是:预测模型的多样性,滚动优化的时序性,在线校正的适应性和工业过程的实用性.预测控制作为一种面向复杂系统的控制策略,一开始就受到国内外控制界众多学者的重视,并在理论研究和实际应用方面均取得了不少成果.近几年来,预测控制的研究与发展已经突破前期研究的框架,摆脱了单纯的算法研究模式,它与极点配置、自适应控制和多模型切换等众多先进控制技术相结合,成为新的一类现代预测控制策略研究领域.随着智能控制技术的进展,预测控制将已取得的成果与模糊控制、神经网络以及遗传算法、专家控制系统等控制策略相结合,正朝着智能预测控制方向发展,从而进一步增强了预测控制面对复杂环境、复杂对象和复杂任务的处理能力,拓展了预测控制理论研究和应用的领域,也充分显示出智能预测控制的重大实用价值.

本书共分 7 章:第 1 章绪论,在概述预测控制发展和早期研究成果的基础上,着重介绍了目前一类先进控制策略和预测控制相结合的现代预测控制以及智能预测控制的研究动向;并对当前不少学者所关注的预测函数控制、多速率采样与多模型切换预测控制的研究方向进行了适当论述.第 2 章模型预测控制基础理论,概要综述了预测控制的数学基础和几种典型预测控制(DMC、MAC、GPC)的基本原理,目的在于作为后续讨论智能预测控制章节内容的基础理论.第 3、4 章是论述复杂系统模糊预测控制和基于人工神经网络的智能预测控制,这是当前智能预测控制研究的主流方向.这两章以多输入、多输出复杂系统为主要研究对象,论述了基于模糊辨识模型与局域线性化模糊模型的预测控制,以及模糊控制与预测控制相集成的具有分层递阶结构的模糊广义预测控制;也论述了神经网络预测控制算法,包括多 BP 网络非线性并行预测控制,神经网络非线性广义预测控制,以及基于径向基函数神经网络的动态矩阵预测控制等智能预测控制策略的研究成果.第 5 章非线性预测控制,在介绍几种非线性预测模型建模方法的基础上,重点论述了基于 Hammerstein 模型、I/O 扩展线性化模型和多模型集成的非线性预测控制策略.第 6 章论述的新型预测控制,主要包括预测函数控制、多速率采样预测控制和多模型切换预测控制等目前颇受关注的新型预测控制策略研究方向及其相关理论.最后一章是前面章节中所涉及到的一些先进预测控制、智能预测控制策略的应用举例与某些实例仿真研究结果.

综观全书内容,可知本书有如下特点:

(1)针对当前越来越多的多变量复杂受控对象在建立参数与非参数机理模型时所遇到的困难,着重论述应用模糊控制理论和人工神经网络原理,通过辨识等方法建立一类精度高、具有知识推理、学习与自适应等功能的智能化预测模型,并对其相关理论和应用机理进行研究与探讨,为预测控制研究开拓了新的领域、增加了新的活力.

(2)对非线性预测控制、预测函数控制和多速率采样预测控制等目前在文献中较少报道的

新型预测控制内容进行了理论探讨和仿真研究,尽管这些工作还是很初步的,希望能起到抛砖引玉的作用.

(3)全书力求基础理论和应用实例相结合,在注重论述预测控制的基本理论、基本概念和基本算法的同时,引入了诸多应用实例及仿真研究结果,而这些内容多为本校自动化学科方向的博士、硕士研究生在学位论文研究课题中获得论证的结果.

(4)全书在内容编排中,充分考虑了由浅入深,循序渐进,突出新理论、新算法和新研究方向,因此适合于控制理论和控制工程、工业自动化等专业方向的师生和工程技术人员参考与阅读,也可以作为相应专业本科生或研究生使用的教材.

本书第5章与第1章、第7章中有关非线性预测控制部分由颜文俊副教授撰写,第6章与第7章的大部分内容 by 诸勇博士撰写.在编写过程中,作者除参考了“参考文献”目录中所列的大量文献资料外,在应用实例与仿真研究等方面还引用了有关博士、硕士研究生学位论文中的理论研究和应用成果,特此说明,并对他们及其导师表示由衷的感谢.

由于预测控制理论涉及面广,在理论上不断有新的进展,加之某些新型预测控制的参考文献较少、撰写时间紧促和作者本人水平所限,难免有错漏与不妥之处,衷心希望师友和读者批评指正,不胜感谢.

作 者

2000年4月于浙江大学

目 录

第 1 章 绪 论

1.1 自动控制理论发展与先进控制技术	(1)
1.1.1 自动控制理论发展简述	(1)
1.1.2 基于模型的先进控制	(2)
1.1.3 基于知识规则和学习推理的先进控制	(7)
1.2 预测控制发展与早期研究	(13)
1.2.1 预测控制技术的进展	(13)
1.2.2 预测控制的早期研究	(14)
1.3 现代预测控制及研究动向	(15)
1.3.1 先进预测控制技术及研究动向	(16)
1.3.2 智能预测控制策略及研究动向	(17)
1.3.3 多种新型预测控制的研究动向	(18)
1.4 非线性预测控制概述	(21)
1.4.1 非线性预测控制的发展与应用	(21)
1.4.2 非线性预测控制的主要方法	(21)
1.4.3 非线性预测控制存在的问题	(22)
参考文献	(22)

第 2 章 模型预测控制基础理论

2.1 预测控制数学基础	(29)
2.1.1 预测模型的数学描述	(30)
2.1.2 丢番图(Diophantine)方程及其求解	(32)
2.1.3 滚动优化和二次型指标	(34)
2.2 几种典型预测控制的基本原理	(35)
2.2.1 动态矩阵控制(DMC)	(35)
2.2.2 模型算法控制(MAC)	(40)
2.2.3 广义预测控制(GPC)	(44)
2.3 线性有约束系统预测控制	(51)
2.3.1 基于 CARMAX 模型的有约束广义预测控制	(51)
2.3.2 有约束模型算法控制	(57)
2.4 线性多变量系统预测控制	(59)
2.4.1 线性多变量系统动态矩阵控制(MDMC)	(60)
2.4.2 线性多变量系统广义预测控制(MGPC)	(62)
2.4.3 线性多变量系统有约束预测控制	(64)

参考文献	(71)
第 3 章 复杂系统模糊预测控制	
3.1 模糊预测控制的数学基础	(72)
3.1.1 模糊集合与模糊数学知识	(72)
3.1.2 模糊控制基础理论	(77)
3.2 模糊模型预测控制	(82)
3.2.1 基于模糊辨识模型的预测控制	(83)
3.2.2 基于局域线性化模糊模型的预测控制	(87)
3.3 多变量系统的模糊预测控制	(91)
3.3.1 基于模糊模型的多变量预测控制	(92)
3.3.2 复杂多变量系统的模糊广义预测控制	(98)
参考文献	(103)
第 4 章 基于人工神经网络的智能预测控制	
4.1 神经网络的基本理论	(105)
4.1.1 神经网络的基础知识	(105)
4.1.2 几种常用神经网络模型的学习算法	(110)
4.1.3 人工神经网络模型辨识	(122)
4.1.4 径向基函数神经网络	(126)
4.2 神经网络预测控制	(130)
4.2.1 神经网络模型预测控制	(130)
4.2.2 多 BP 网络非线性并行预测控制	(133)
4.2.3 神经网络非线性广义预测控制	(134)
4.3 基于径向基函数神经网络的预测控制	(137)
4.3.1 RBF 网络预测控制建模	(138)
4.3.2 RBF 网络动态矩阵预测控制	(140)
4.3.3 基于预测偏差的 RBF 网络预测控制	(143)
附录 4-1: 定理 4-1 的证明	(146)
参考文献	(147)
第 5 章 非线性预测控制	
5.1 非线性预测控制模型	(149)
5.1.1 Volterra 级数	(149)
5.1.2 NARMAX 模型	(150)
5.1.3 二维 ARMAX 模型和二维 NARMAX 模型	(151)
5.1.4 Hammerstein 模型	(151)
5.1.5 I/O 扩展线性化模型	(151)
5.1.6 非线性系统的多模型方法	(153)
5.1.7 其他模型方法	(154)
5.2 非线性预测控制	(154)
5.2.1 基于 Hammerstein 的非线性预测控制	(154)
5.2.2 基于非线性线性化的预测控制	(159)

5.2.3 具有典型非线性特性的预测控制	(164)
5.2.4 基于一种集成模型的多变量非线性预测控制	(166)
附录 5-1:定理 5-2 的证明	(170)
参考文献	(171)

第 6 章 新型预测控制

6.1 预测函数控制	(174)
6.1.1 预测函数控制的基本原理	(174)
6.1.2 典型环节的 PFC 算法	(177)
6.1.3 预测函数控制的内模结构	(183)
6.2 多速率采样预测控制	(184)
6.2.1 多速率采样系统建模	(186)
6.2.2 多速率采样预测控制算法	(189)
6.2.3 多速率广义预测控制	(194)
6.3 多模型切换预测控制	(198)
6.3.1 线性定常系统的多模型切换预测控制	(198)
6.3.2 复杂系统的多模型切换预测控制	(201)
参考文献	(207)

第 7 章 智能预测控制的应用研究

7.1 几种典型预测控制的应用研究	(208)
7.1.1 喷雾干燥塔的动态矩阵控制	(208)
7.1.2 机器人预测控制	(212)
7.1.3 加热炉炉温预测控制	(218)
7.1.4 常压塔有约束预测控制	(221)
7.2 智能预测控制的应用研究	(224)
7.2.1 模糊预测控制应用研究	(224)
7.2.2 神经网络预测控制应用研究	(226)
7.2.3 基于神经网络的模糊预测控制应用研究	(230)
7.3 新型预测控制的应用研究	(234)
7.3.1 预测函数控制应用研究	(234)
7.3.2 多速率采样预测控制仿真研究	(236)
7.3.3 多模型预测控制应用研究	(241)
7.3.4 具有连续—离散输入的混杂系统预测控制和应用	(248)
7.4 基于 Hammerstein 模型的非线性预测控制仿真	(251)
参考文献	(254)

第 1 章 绪 论

1.1 自动控制理论发展与先进控制技术^[1-1,1-2]

1.1.1 自动控制理论发展简述

20 世纪 50 年代前后发展起来的“经典控制理论”，主要研究线性定常系统，被控对象也几乎全部是单输入-单输出系统，采用的方法通常是以传递函数、频率特性、特征根分布为理论基础的波德(H. W. Bode)图法和依凡思(W. R. Evans)的根轨迹法，包括劳斯(E. J. Routh)-赫尔维茨(A. Hurwitz)代数判据、奈奎斯特(H. Nyquist)稳定性判据与希望对数频率特性的分析与综合等方法。

20 世纪 60 年代末，由于航天飞行器等空间技术开发的需要而发展起来的“现代控制理论”，主要研究多输入-多输出的被控对象，系统可以是线性或非线性的、定常或时变的，它用状态方程(即一阶微分方程组)替代经典理论中的高阶微分方程来进行系统描述，并且把系统中各个变量均取为时间 t 的函数，因而它属于时域分析法，有别于经典理论中的频域方法，这样更有利于用计算机进行运算和控制。此外，状态变量的选取可以不一定是系统的物理量，因而具有更大的灵活性，这就是系统状态空间描述的特点所在。现代控制理论的主要内容有：研究系统状态空间建模和能控性、能观性分析；李亚普诺夫(A. M. Ляпунов)稳定性理论和李亚普诺夫函数；系统辨识和卡尔曼(R. E. Kalman)滤波理论；基于庞特里亚金(Понтрягин)极大值原理(1961 年)和贝尔曼(R. E. Bellman)于 1957 年根据哈密尔顿-雅可比(Hamilton-Jacobian)方程提出的动态规划原理的最优控制理论等。

半个世纪以来，经典和现代控制理论的发展和运用，对于存在数学模型的自动控制系统领域发挥了巨大作用，并取得了令人满意的控制效果，促进了人类社会的进步和生产力的突飞猛进。然而，随着科学技术的发展与被控对象的复杂化，对于现有大范围多参数时变、大滞后以及具有严重非线性和强耦合的多输入、多输出系统，要建立精确数学模型非常困难，为此，近十几年来发展了多种先进控制理论和技术。与此同时，利用人工智能把人们的思维过程模型化和快速发展的计算机技术来模仿人的智能，包括判断、理解、推理、预测、识别、规划、决策、学习和问题求解等，促进了一类基于非数学模型的智能控制方法的发展。

现有先进控制技术及其分类：^[1-15]

1.1.2 基于模型的先进控制

有些先进控制策略还是需要基于受控对象的机理模型或辨识模型,其中包括:

一、严格模型适配(exact model matching)

严格模型适配是控制系统的一种综合方法,它通过对受控对象附加一个补偿器,使它的动态特性与给定的期望控制系统的参考模型严格一致,因此,称为严格模型匹配.如图 1-1 所示,当受控对象的传递函数为 $b(s)/a(s)$ 时,被给定的期望控制系统的参考传递函数为 $b_d(s)/a_d(s)$,这里 $a(s), b(s), a_d(s), b_d(s)$ 分别为 s 的 n, m, n_d, m_d 次多项式. 设 $n_d - m_d \geq n - m$, $a(s)$ 和 $a_d(s)$ 的最高次系数归一化要求配置有补偿器的系统满足下列方程:

$$b(s)a_d(s) = p(s)a(s) - f(s) \quad (1-1)$$

$$a(s)g(s) + b(s)h(s) = f(s)K(s) \quad (1-2)$$

这样就可以得到期望控制系统的传递函数. 其中根据(1-1)式由 $a(s)$ 除 $b(s)a_d(s)$ 得到商 $p(s)$ 和余数 $-f(s)$; 选择具有合适快速衰减特性的 $n-1$ 次多项式 $K(s)$, 由式(1-2)求解 $n-1$ 次以及 $m-1$ 次多项式 $h(s), g(s)$, 若 $a(s)$ 和 $b(s)$ 是不可约的话, (1-2)式有惟一解, 构成状态估计器 $h(s)/K(s)$ 和反馈补偿器 $g(s)/K(s)$, 这里 $p(s)$ 具有 n_d 和 n 次差的弥补作用.

二、带有前馈补偿的二自由度控制(two-degree of freedom control)

在图 1-2 所示的一个控制系统中, 如果从目标值到控制量传递特性和外界扰动到控制量的传递特性, 是可以单独调整的两个独立的传递特性, 则称其为具有二自由度控制系统.

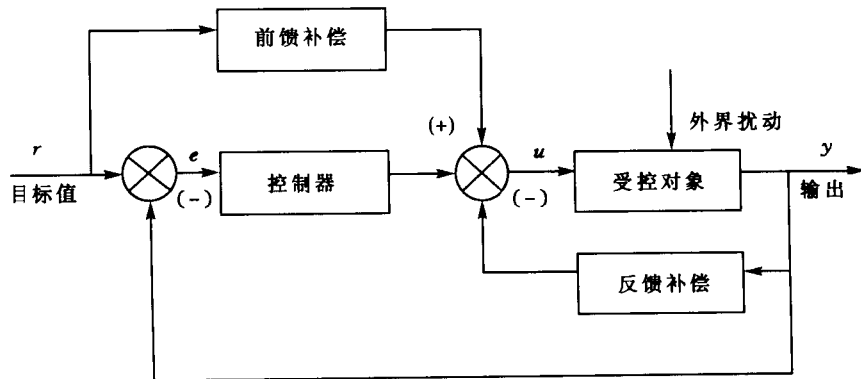


图 1-2 二自由度控制

若去掉该控制系统中反馈补偿器和前馈补偿器, 则成为串联型 PID 控制方式. 这时, 如果

按目标值到控制量间的传递特性来设计系统参数,那么从外界扰动到控制量间的传递特性就无法保证满足要求,反之亦然.如加上反馈补偿器,系统成为含有PID控制的反馈补偿型,系统的特性决定于反馈补偿器的传递特性,则无论从目标值到控制量,还是从外界扰动到控制量,其快速性和衰减性将是一致的,如果再加上前馈补偿器,控制系统从目标值到控制量的特性就可以由前馈补偿器参数来独立调整.

三、解耦控制(decoupling control)

在多变量控制系统中,往往存在多个输入—输出变量之间的耦合作用,如何消除这种耦合,使输入目标值与输出控制量间做到一一对应,这就是非常实用的解耦控制,如图 1-3 所示,但是,为了消除这种耦合,使控制数量变得更加复杂,它的调节也甚困难.

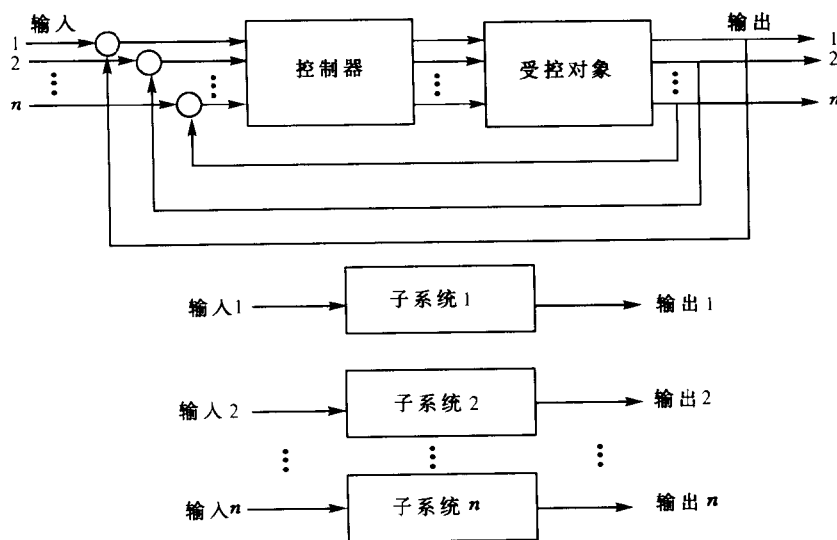


图 1-3 解耦控制

四、精确线性化(exact linearization)

在非线性系统中,控制器的设计往往在其工作点附近采用台劳级数展开,对非线性进行一次线性近似,这是一种近似线性化的方法.与此相对应,若在非线性系统中加上非线性反馈,使原来非线性系统成为线性系统,这种并不是近似而是完全线性化的方法称为精确线性化,如图 1-4 所示,这不只是在某些工作点附近获得线性近似,而且要在系统整个工作域范围内得到精确线性化保证.

近年来,不只是采用非线性反馈,还可以采用输入变换和输出坐标变换的方法,使更广泛类别的非线性系统有可能成为精确线性化.但是,能够精确线性化的系统是有限的,与近似线性化相比,可以适用的非线性系统范围较狭窄.虽然对于已经线性化系统的分析和综合,可以采用线性控制理论,但是针对已线性化系统的鲁棒性设计等控制规则,也未必是原来非线性系统的鲁棒控制规则.

五、鲁棒控制(robust control)

多数控制系统是根据被控对象的数学模型来进行设计的,由于模型与实际对象之间存在

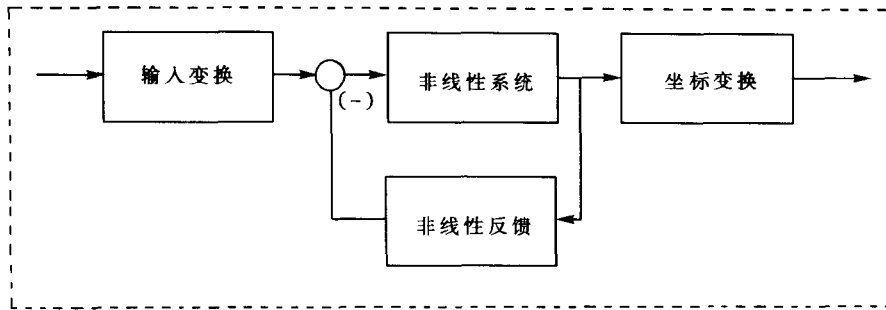


图 1-4 精确线性化系统

线性化中被忽略的非线性和降阶中被忽略的动特性等模型化误差,以及控制装置的时变不稳定性,因此鲁棒控制就是研究控制器设计,当系统有一定范围的参数不确定性及一定限度的未建模误差时,使系统闭环仍能保持稳定并保证期望的动态品质.此外,考虑到控制系统的变动,传感器及执行元件的故障仍能保证系统的整体性质和稳定性.若已知受控对象传递函数 $G_0(s)$ 和给定有理函数 $g_d(s)$,设计如图 1-5 所示的反馈系统,对于建模误差 $\Delta G(s)$ 满足 $|\Delta G(j\omega)| < |\gamma(j\omega)|, \forall \omega \in (0, \infty)$ 时,使闭环系统稳定,即为鲁棒稳定性,若系统在上述稳定前提条件下,仍能保证在给定性能指标要求下运行,即为性能鲁棒性.

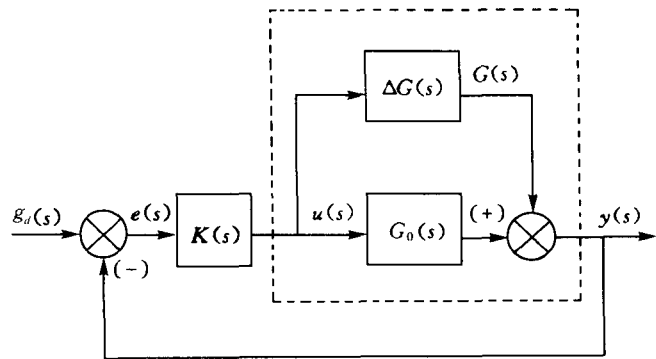


图 1-5 反馈系统

鲁棒性理论主要有:

(1) Kharitonov(1978)定理(将区间多项式中无穷多个多项式的稳定性与多面体四个顶点的稳定性等价)和 Bartlett(1988)给出的多项式凸多面体的棱边定理.

(2) Zames(1981)的 H_∞ 控制理论^[1-3]和 Doyle(1982)提出的结构奇异值理论(μ 理论),^[1-4]可根据范数界限扰动有效地描述模型不确定性,成为判别鲁棒稳定性和鲁棒性能的强有力工具.^[1-5,1-6]

主要方法有:研究对象是闭环系统的状态矩阵或特征多项式的代数方法,从系统传递函数或传递函数矩阵出发的频域法.

六、方差控制(covariance control)

方差控制是针对系统不确定性外界干扰,给定被控制量协方差的一种控制方法.它的特点是:并不是以提高系统整体精度为目标,而是考虑到必要性、成本等因素,对每一个被控量给定协方差精度要求.如果取控制量为系统状态,则协方差矩阵就是可控性的定量评价,它表示单位能量作用下,系统状态向什么方向、作怎样程度的运动.此外,协方差矩阵本身具有的物理意义,与指数稳定性、鲁棒稳定性相关,可以被反映在各种各样的设计方法中,而且协方差矩阵在系统辨识、降阶等过程中,也是有用的指标,有可能成为从系统建模到控制系统设计一直有用的指标.

七、变结构控制(VSC—variable structure control)

变结构控制(VSC)是由前苏联学者欧曼尔扬诺夫(S. V. Emelyanov)、犹特金(V. I. Utkin)和依特克斯(U. Itkis)等人于20世纪60年代初首先进行研究,^[1-7]30多年来VSC已经形成成为新型控制技术的一个重要分支。VSC是在状态空间设定的切换面上,约束控制系统的动态,频繁地切换两个控制规则。如图1-6所示,按控制规则A, B沿切换面上、下两边反复切换,使状态P搜索至原点。VSC在多数情况下是指滑模(sliding mode)控制,但从广义上讲,如开关控制、多模态控制也属于变结构控制。这种控制方法具有鲁棒性和稍微吸收模型化误差的能力。若要增加这种能力,有必要用具有大增益的控制规则切换,这势必增加控制能量和执行元件功耗。

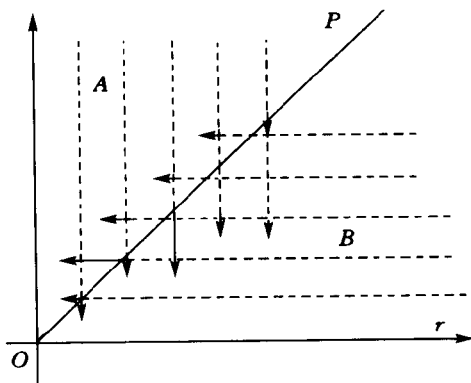


图 1-6 滑模控制

八、最优控制(optimal control, optimum control)

为了使评价控制系统工作的某一目标函数最小(或最大)来确定控制量的这类问题被称为最优控制问题。如 H_∞ 范数最优控制也属于此范畴。这类问题的解是控制量,它是状态变量的函数,特别在考虑到时间域为无限大时,由Riccati代数方程式来求得最优解,最优控制量由时不变状态反馈增益来实现。

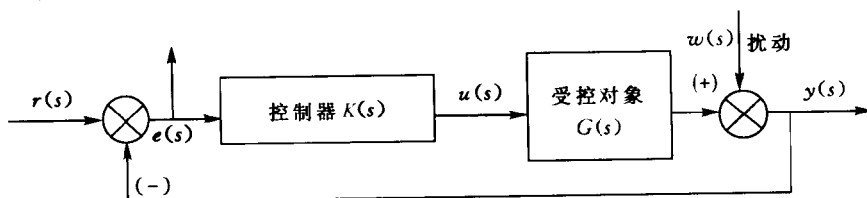


图 1-7 反馈系统框图

H_∞ 优化控制(H_∞ optimal control)设计思想的真髓是频域特性整形。对图1-7反馈系统定义:

$$S(s) = \frac{y(s)}{w(s)} = \frac{1}{1 + K(s)G(s)} \quad (1-3)$$

为系统灵敏度函数。若设计控制器 K 时,使 $|S(j\omega)|$ 在低频段 $0 < \omega < \omega_0$ 的增益尽量小,从而保证系统闭环特性在该频段对干扰和模型误差的影响抑制在允许范围内,这就是系统整形,它要求控制器 K 满足:

$$\max |W(j\omega)S(j\omega)| < \epsilon \quad (1-4)$$

且等价于 $\|W(s)S(s)\|_\infty < \epsilon$,这里 $W(j\omega) = K(j\omega)G(j\omega)$, ϵ 为给定的小正数;当 $\epsilon = 1$ 时,频域特性整形如图1-8所示。

H_∞ 控制标准问题是对广义被控对象 G ,设计一个实、正则控制器 K ,以确保图1-9系统内部稳定条件下,使扰动输入 w 到控制输出 Z 的传递函数 $\phi(s)$ 的 H_∞ 范数满足 $\|\phi\|_\infty < \epsilon$ 。图1-9中, u, y 为控制输入和观测输出。设传递函数阵 $G(s)$ 实现为:

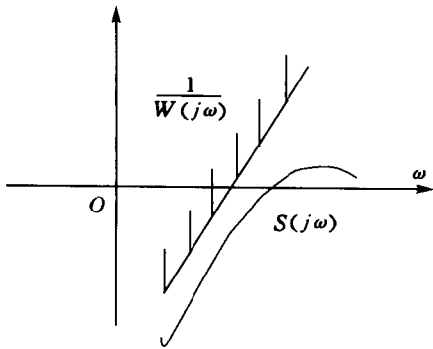


图 1-8 频域特性整形

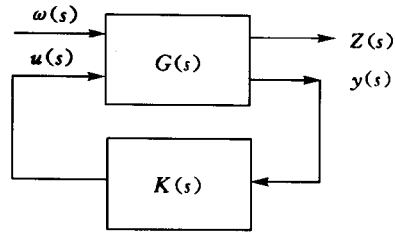


图 1-9 H_∞ 标准问题

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + B_1\omega + B_2u \\ Z = C_1X + D_{11}\omega + D_{12}u \\ y = C_2X + D_{21}\omega + D_{22}u \end{cases} \quad (1-5)$$

可表示为:

$$\begin{bmatrix} Z(s) \\ y(s) \end{bmatrix} = G(s) \begin{bmatrix} \omega(s) \\ u(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega(s) \\ u(s) \end{bmatrix} \quad (1-6)$$

式中: $G_{ij}(s) = D_{ij} + C_i(SI - A)^{-1}B_j$, 由 ω 至 Z 的闭环传递函数:

$$\phi(s) = G_{11}(s) + G_{12}(s)K(s)(I - G_{22}(s)K(s))^{-1}G_{21}(s) \quad (1-7)$$

九、自适应控制(adaptive control)

常规的控制问题大致可分为:已知控制对象特性的模型辨识问题和根据已知模型特性决定控制量的控制规律设计问题,这两者原本应该是综合起来考虑的,但是,往往是由于分开考虑以后,引起两个问题的整体性变差.自适应控制就是把辨识和设计结合起来考虑的一种新型控制方式,由推断对象未知特性的辨识部分和基于已经推定特性与已经测定值来决定控制量的控制器,构成如图 1-10 所示的系统.

可是把辨识和控制规则单纯地组合,其效果是微小的.在自适应控制及其应用研究中,通常应该是两者相融合的,探索容易辨识的控制与容易控制的辨识是自适应控制的原意,在自适应控制理论中,虽然以在线辨识为中心,但是所提供的原理框架在离线辨识中也是有效的.“调整”是在控制现场不可缺少的作业,将这种作业也进行自动化的自适应控制,

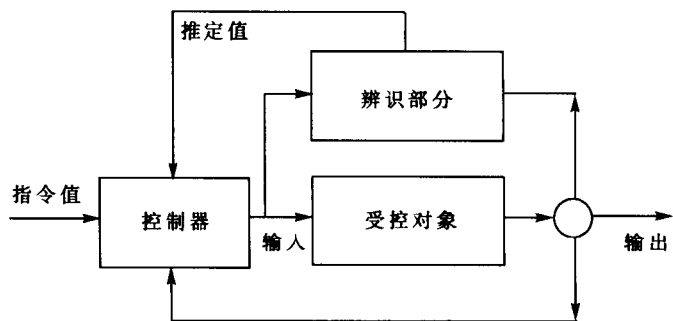


图 1-10 自适应控制的结构

应该是节能、减少偏差和消除长期运行而产生的不确定性的最恰当手段.从这个观点出发,最近引人关注的神经元技术,有可能是保持自适应功能的一种途径.但是不管是自适应还是神经元,要增加这样高难度的推理功能,必然招致控制装置过于繁杂的危险性,这是在产品化时必须防止的.

十、分散控制(decentralized control)

随着近年来技术的进步与发展,系统更复杂而规模更大.用集中控制的方式控制大规模的控制对象,势必使控制规则变得很复杂.另外,由于物理上的制约,困难也不少.在这种情况下,可以把大规模系统分成几个子系统来控制.对于这样受控制对象的子系统,分散配置控制装置,分别规定各自的控制方法,就是分散控制,如图 1-11 所示.

如果从数学上来看,分散控制是对集中控制加以结构上约束的一种特殊情况.因此,分散控制性能要比集中控制差;与此相反,是针对控制对象的各子系统进行控制器设计,设计时应该充分考虑到各子系统特性,并且具有容易进行最后调整的特点.还有,由于各子系统控制间不存在耦合,容易对控制器故障进行估计,具有进行容错设计的特点.

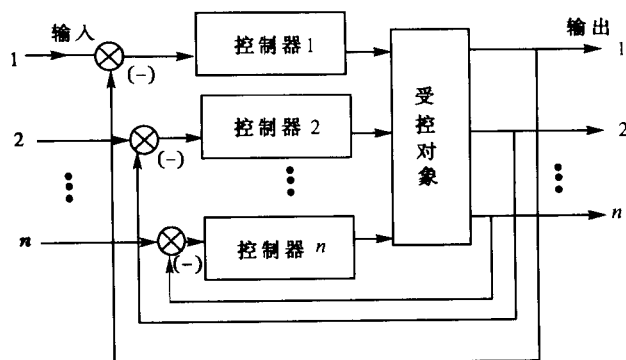


图 1-11 分散控制系统

基于模型的先进控制策略,除了以上几种以外,还有本书要论述的模型预测控制(MPC—model predictive control)以及有限极点配置和逆模控制等.

1.1.3 基于知识规则和学习推理的先进控制

这里主要是指一类无需人为干预,能够独立驱动智能机器实现其目标的自动控制技术,即智能控制.^[1-3]

智能控制的特点是:

(1)它是一门多学科交叉、综合性很强的边缘学科,并需要它们之间的配合与支撑,它的理论研究与技术进展将会渗透到各个新兴领域.

(2)它主要针对那些具有复杂性、非完全性、模糊性或不确定性的对象,由数学模型和用知识表示的非数学广义模型相结合,通过知识推理、学习、启发引导,进行问题求解来实现拟人控制.

(3)它的核心是高层组织级控制,该层任务是对现实环境、过程或对象进行规划、决策,实现广义问题求解,且具有拟人思维过程的特征.

智能控制的核心是智能控制器,它是对人脑神经结构、思维或专家决策结构的一种模仿.它应该:

(1)具有分层信息处理和决策功能.

(2)具有变结构特性.当按当前规律调整参数得不到满足时,能以跃变方式改变控制模式与结构.

(3)具有人类思维、决策的非线性特性.

(4)具有总体自学习、自寻优能力,能不断优化和搜索最佳参数与结构,达到总体最优控制性能.

智能控制及其系统的主要类型有模糊控制、神经网络、专家控制系统、学习控制和递阶智能控制等。

一、模糊控制(fuzzy control)

模糊控制由美国加利福尼亚大学查德(L. A. Zadeh)教授首先提出。模糊控制是以模糊数学为基础,用模糊语言规则表示知识的方法和先进的计算机技术,由模糊推理规则进行判决的一种新型控制技术。它属于智能控制范畴,发展至今 30 多年来已经成为人工智能领域中的一个重要分支,而且有很大的实用意义。^[1-9]

由于人类的思维是极其粗犷的,语言表达有时是暧昧的逻辑判断。“模糊”适用于人类的观察、思维、理解与判断,也更适合于对客观事物(物体、对象或观念)界定(例如类属面划分)的模糊性(fuzziness),而模糊概念就是这种外延不清晰的概念,如高温、快速等。

模糊控制系统(fuzzy control system)是以模糊控制理论为基础,采用计算机控制技术构成的一种具有反馈通道闭环结构的数字控制系统,它由模糊控制器、输入/输出接口、执行机构、被控对象和测量装置等五个部分组成,参见图 3-2。

模糊控制器是一种语言型控制器,通常由输入量模糊化接口、数据库、规则库、推理机和输出解模糊接口等五部分组成,参见图 3-3。模糊控制系统的核心是模糊控制器,它的结构、模糊规则、模糊推理算法以及模糊决策决定了系统性能的优劣。

目前,以非线性理论为基础进行模糊控制系统稳定性的研究;同时,采用作为模糊技术中最大特点的隶属函数的连续化和神经元等技术的软计算(soft computing)正受到国内外学者的关注。

二、神经网络控制(neural network control)

神经网络控制是使用人工神经网络作为控制器(或者是其中一部分)对被控系统进行学习、训练和控制,是一类智能控制系统,它具有非线性函数逼近、大规模并行处理、学习和适应、自组织等能力,适宜于构成智能控制系统和硬件实现。

人工神经元是对生物神经元的模拟与简化,是神经网络连接机制结构的基本处理单元。如图 1-12 所示,是一个多输入单输出的非线性人工神经元。当阈值为 θ_i ,第 i 个神经元输出 y_i 与连接权系数为 w_{ij} 的 n 个输入 x_j 间的关系为:

$$y_i = f\left(\sum_{j=1}^n w_{ij}x_j - \theta_i\right) \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (1-8)$$

式中: $f(\cdot)$ 为激励函数,是神经元输入输出间的传递变换函数。它可以是线性的或连续非线性的,通常有:阈值函数、S(Sigmoid)形函数和高斯函数等。

神经网络是由人工神经元按平行分布结构互连而成的信息处理网络,亦称人工神经网络,目前众多的神经网络模型大致可以分成三大类,即:前馈网络、互连网络和自组织网络。

在神经网络中,由于基本上没有像微分、积分这样的动态算子,因此一般只能学习静态非线性函数;而另一方面,一般对控制装置的动态性能也有要求,也就是对神经网络动态也有期望。因此,尽管有各种各样的处理方法,但是,最简单的是外加积分器和微分器。当把它们

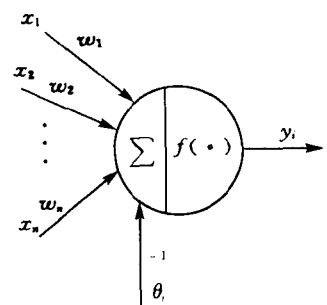


图 1-12 人工神经元

的输出用作神经网络的输入信号时,神经网络也可以学习非线性动态函数了.

三、基于规则库控制(rule-based control)

人们构造的控制系统,多数情况下是与人分不开的,若考虑人机接口,不仅可以用数学式子来预示规则、动作等,而且,正像开关控制那样,更多的是倾向于用规则描述控制,特别是像顺序动作那样的规则,而作为控制装置核心的计算机也是面向规则描述的.综合这些诸多有利条件,规则库控制方式成为当前的人工智能之一,得到迅速发展和推广,如图 1-13 所示.

通常的规则是由条件和操作两部分组成,而且把许多规则集中在一起构成规则库.当已经具有相应于控制系统当前状态的条件部分的一条规则被选中,则逐步执行写在操作部分的各项操作来取代操作人员的操作.专家系统(expert system)就是基于规则库控制的一种.

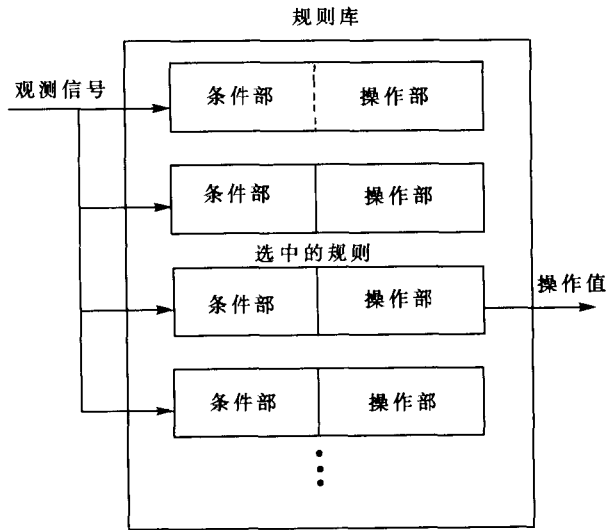


图 1-13 规则库控制

(1) 专家系统的先驱者费根鲍姆(Feigenbaum)教授把专家系统定义为一个智能计算机程序,它通过知识库和推理过程来解决那些需要大量专家的知识 and 经验才能解决的难题.专家系统的典型结构如图 1-14 所示.近年来发展的新型专家系统有分布式专家系统和协同式专家系统等,其特点是:①并行技术与分布处理;②高级语言和知识语言的描述功能;③先进的智能人机接口;④具有自学习功能;⑤引进新的推理机制;⑥多专家系统协同工作;⑦具有自纠错和自完善能力.

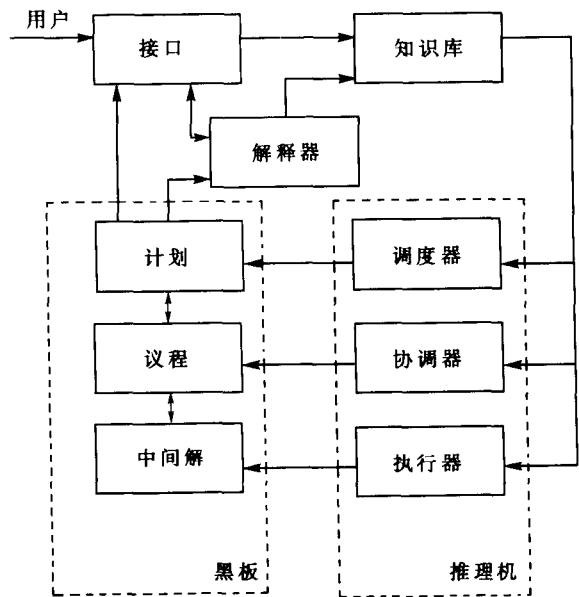


图 1-14 专家系统结构

(2) 专家控制系统(expert control system)也是一种典型的和广泛应用的基于知识规则的控制系,于 1983 年由海斯·罗思(Hayes-Roth)提出,并于 1984 年首次应用于炼油的分布式实时过程控制系统.专家控制系统是应用专家系统的概念和相关技术,模拟人类专家的控制知识与熟练工程技术人员的操作经验所构造的智能型控制系统.

专家控制系统与专家系统的区别为: