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应用，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 moled 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 $n_d-m_d\geqslant n-m$，$a(s)$ 和 $a_d(s)$ 的最高次系数规一化要求配置有补偿器的系统满足下列方程：

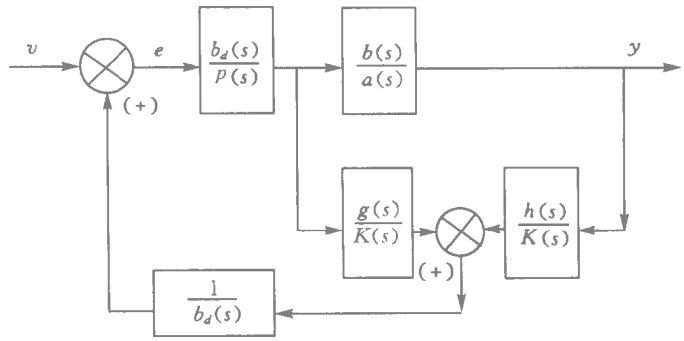


图 1-1 严格模型适配

$$b(s)a_d(s)=p(s)a(s)-f(s) \tag{1-1}$$

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

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.

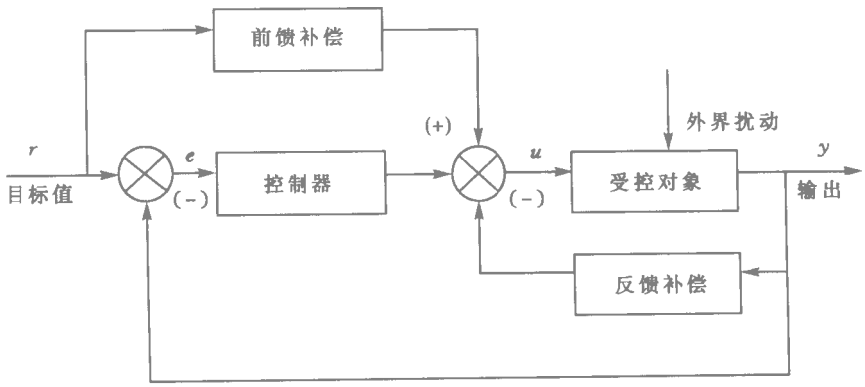


图 1-2 二自由度控制

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.

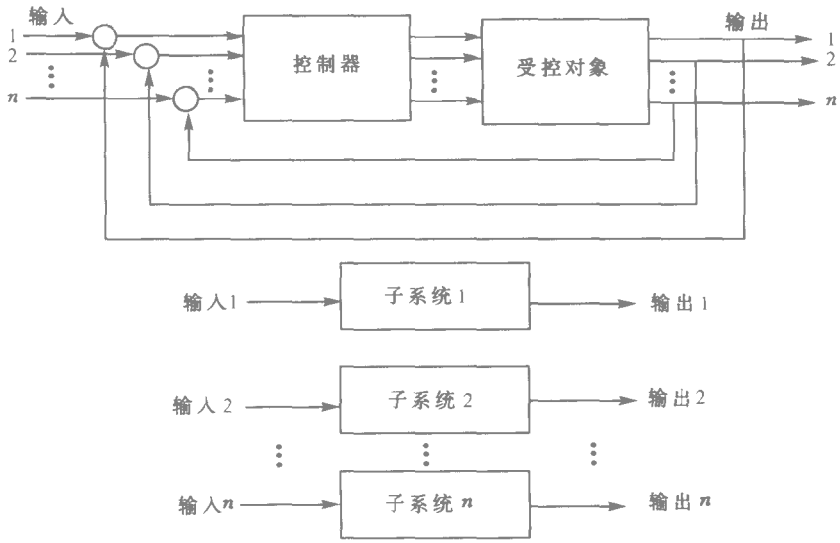


图 1-3 解耦控制

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

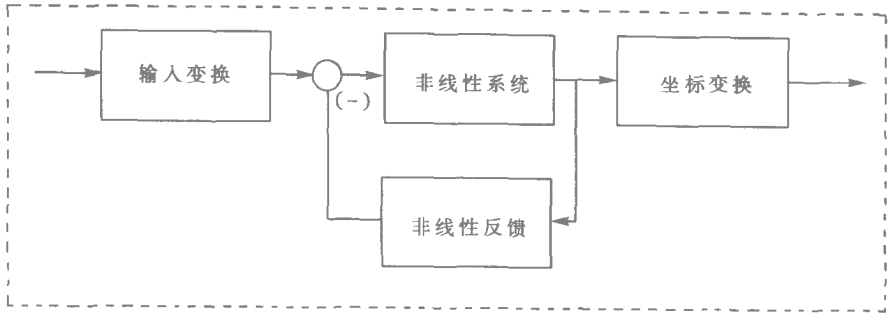


图 1-4 精确线性化系统

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确定性，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.

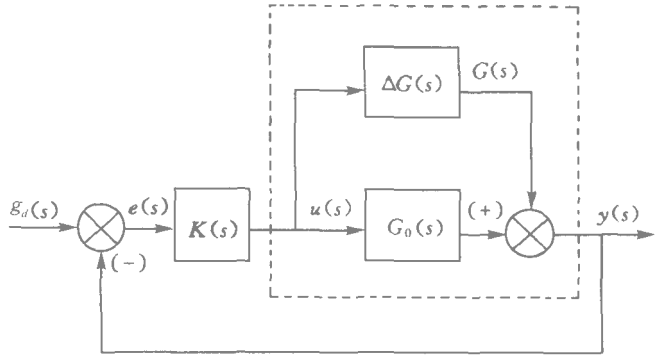


图 1-5 反馈系统

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.

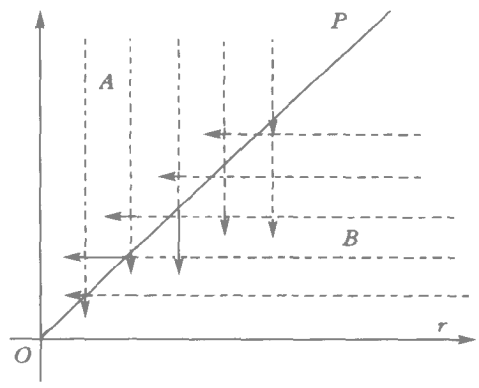


图 1-6 滑模控制

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.

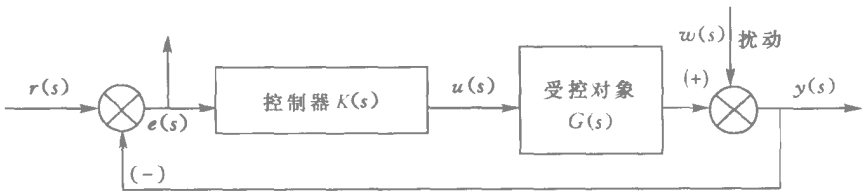


图 1-7 反馈系统框图

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：

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

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：

$$\max|W(j\omega)S(j\omega)|<\varepsilon \tag{1-4}$$

且等价于 $\|W(s)S(s)\|_\infty<\varepsilon$、这里 $W(j\omega)=K(j\omega)G(j\omega)$，$\varepsilon$ 为给定的小正数；当 $\varepsilon=1$ 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 $\|\phi\|_\infty<\varepsilon$. 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：

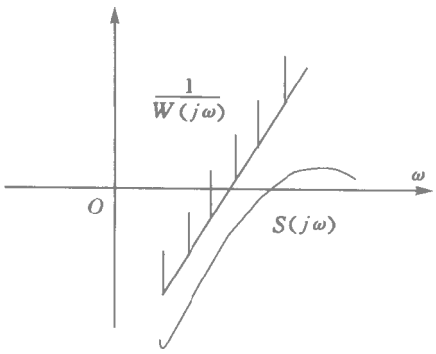


图 1-8 频域特性整形

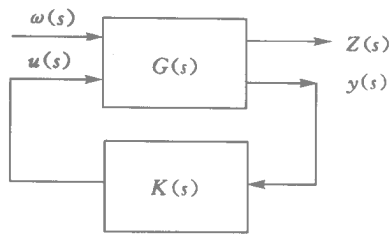


图 1-9 H_∞ 标准问题

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

可表示为：

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

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

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

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。

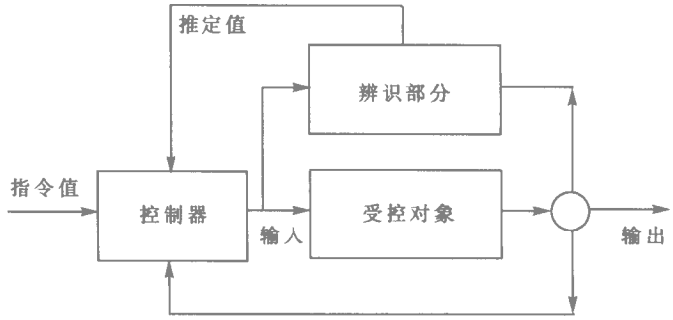


图 1-10 自适应控制的结构

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，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．

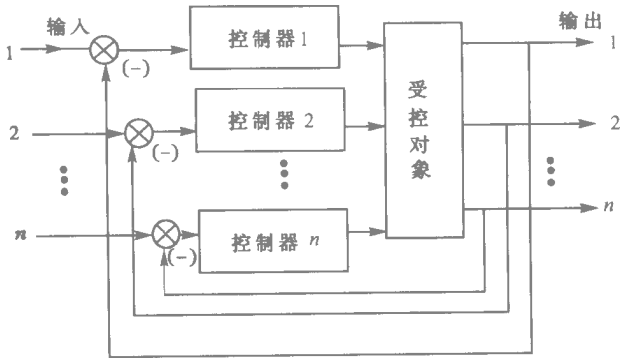


图 1-11　分散控制系统

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．

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．[1-8]

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、神经元网络、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元网络作为控制器(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,第 i 个神经元输出 y 与连接权系数为 w_{ij} 的 n 个输入 x_j 间的关系为:

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

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.

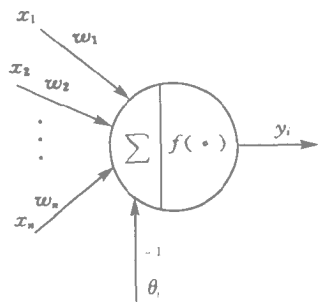


图 1-12 人工神经元

神经元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,亦称人工神经元网络,目前众多的神经元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.

在神经元网络中,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,也就是对神经元网络动态也有期望. 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

的输出用作神经元网络的输入信号时，神经元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.

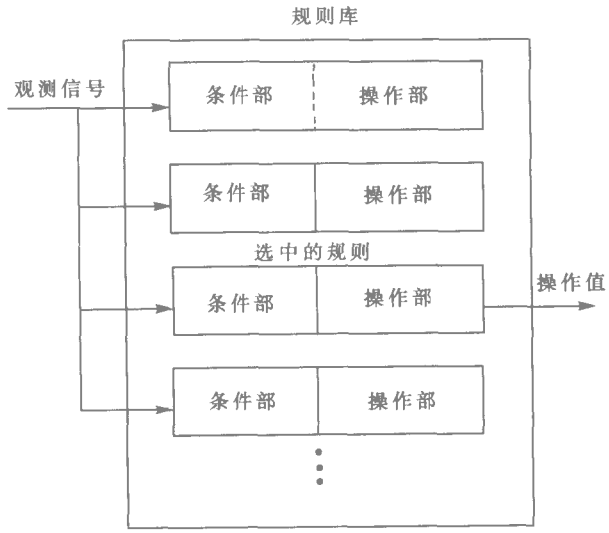


图 1-13 规则库控制

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. 当已经具有相应十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.

（1）专家系统的先导者费根鲍姆（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和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；①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.

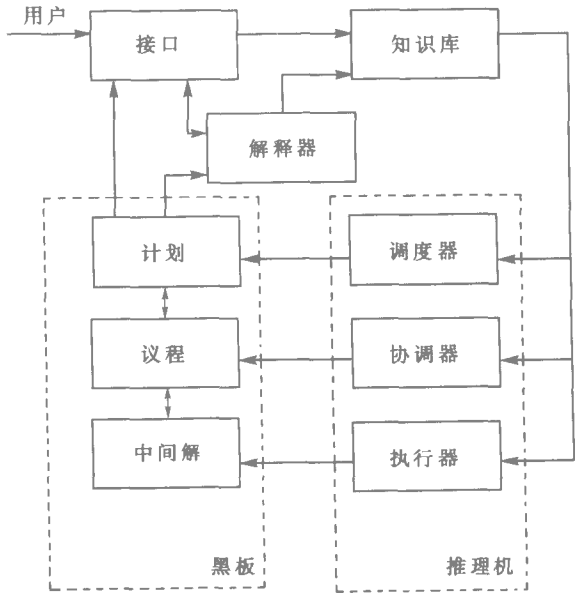


图 1-14 专家系统结构

（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统，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：

(1)从广义上讲，专家系统可在各个领域得到普遍应用. 针对某一领域的专家系统要求可靠性高,并有解释、预测、分析、诊断、调试、设计、规划、控制、监视、教学、检测、咨询、管理、评估和快速决策等功能；而专家控制系统是“专家系统”族内的成员之一，它是以智能控制为目标领域，且具有分析、诊断、控制、调试和预测等多种功能.

(2) 专家系统的推理是以知识规则为基础，推理结果有原知识项、新知识项，以及对原知识项的更新项；而专家控制系统需要独立、自由地作出控制决策，其推理结果是更新的知识项或是启动（执行）某些解析算法.

(3)专家系统通常以离线方式工作，而专家控制系统需要采集在线动态信息，对系统进行实时控制.

专家控制系统的典型结构如图 1-15 所示，通常由于其应用场合不同、对控制的要求不同而结构也有所不一样，但几乎所有的专家控制系统都包含知识库、推理机、控制规则库和／或控制算法等.

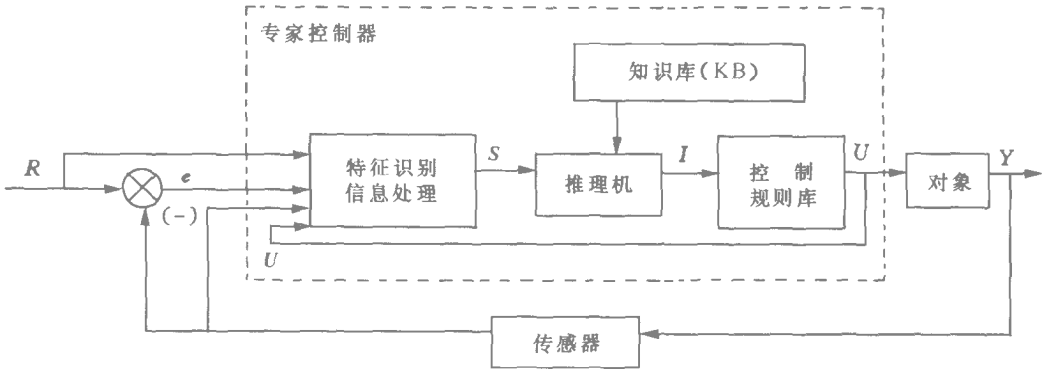


图 1-15 专家控制系统典型结构

目前，已开发的有工业专家控制系统、黑板专家控制系统和实时专家控制系统等. 此外，在家电中已经被应用的人工智能控制也是规则库控制的一种，不过这种智能控制实际上类似于查表，也就是说，把对应于各条件的操作量寄存在存储器内，向存储器读取时，就能决定操作量，也包括增量表控制，这对于非线性特性的补偿是有效的办法.

四、学习控制(learning control)[1-14]

学习控制是智能控制最早研究的领域之一，它能够在系统运行过程中采集有关系统的未知信息，并据此按经验进行估计、分类、推理、决策，进行最优控制，以便不断改善系统品质，直至系统有期望或令人满意的动态、静态性能. 由此可知，学习控制的机理过程为：寻求动态控制系统输入输出间的简单传递关系——执行一个由前一步控制过程学习到的新的控制过程，使系统能优于前一个过程——重复这种学习过程、记忆学习结果，稳步改善受控系统的性能指标 .

目前，学习控制的方案大致有如下几种：

(1)基于模式识别的学习控制：其中有史密斯(F. W. Smith)于 1964 年提出的一种基于模式识别自适应原理的棒-棒 (bang-bang) 控制；傅京孙(Fu , K. S.) 等人于 1965 年提出的把启发式规则用于再励学习（或强化学习）控制和利用贝叶斯（Bayes）学习估计的学习控制方法等.

(2) 基于规则的学习控制：如傅京孙等人于 1969 年提出的基于模糊规则推理的模糊学习

控制.

由于上列两种学习控制存在着收敛速度慢、占有内存大等缺点，20世纪80年代初日本学者提出了另外两类学习控制原理，并引起人们的关注.

(3) 重复学习控制(repetitive learning control)是由内山于1978年首先提出，并用于机器人操作机；此后，1980年井上、中野等人针对电子同步加速的电源控制研究，提出了频域范围的重复学习控制.[1-10]

(4) 反复学习控制(iterative learning control)是1984年由有本、川村和宫崎等人将内山等人研究成果进一步发展，并予以理论化，提出的在时域范围的学习控制.

此后，古田等人于1986年基于希尔伯特(Hilbert)空间和逆时间角度，提出了一种多变量的最优反复学习控制；1987年又有人提出了多步反复学习控制方法等.

(5) 连接主义学习控制(connectionist learning control)自20世纪80年代初期以来，神经元网络技术的研究和发展，为连接主义学习控制开创了新的途径. 由霍普菲尔德(J. J. Hopfield)于1985年提出的一种具有联想记忆功能的反馈互连网络学习控制，以及由鲁姆尔哈特提出的能实现多层神经网络的误差反向传播模型的学习控制等，近年来对连接主义的学习控制研究较为引人关注.

(一) 重复学习控制[1-11～1-13]

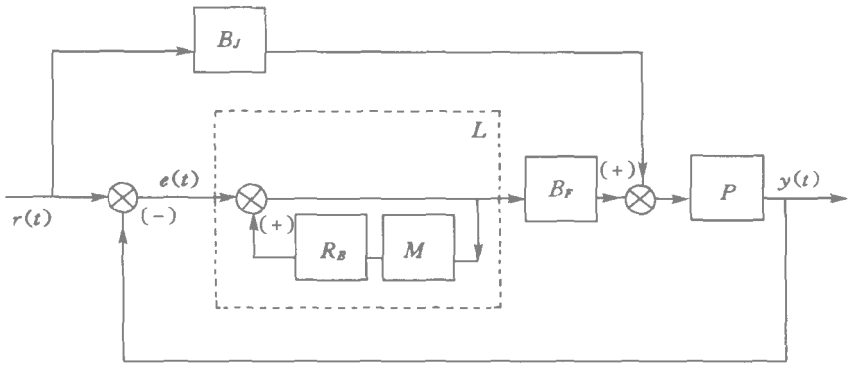


图 1-16 重复学习控制

重复学习控制是利用一个周期的偏差来高精度地跟随周期性目标输入的一种新型伺服系统，如图1-16所示，由受控对象 P、前馈补偿器 B_J、反馈补偿器 B_F 和学习部分 L 组成。并且

$$L(s)=1/(1-R_B(s)M(s)) \tag{1-9}$$

表示一种新型的伺服补偿器，称为“重复补偿器”，其特点是，在常规的偏差反馈控制中，附加有相应于目标输入周期为 h 的超前时间偏差信号的反馈. 如果把 L 部分画成图1-17(a)所示，当取 $R_B(s)=1$，则重复补偿器可以看作一种周期为 h 的周期函数发生器. 根据“内部原理”，若把这个发生器加入控制系统的主反馈回路内，则系统对于周期为 h 的任意周期目标函数所产生的定常偏差为零，因此，这是一种消除周期变化外界干扰的有效控制方式. 其中 R_B

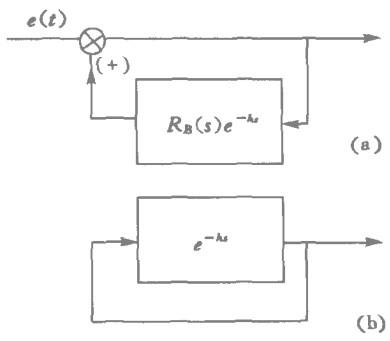


图 1-17 (a)重复补偿器
(b) 周期函数发生器

（s）是为了估计系统稳定性而引入的鲁棒滤波器，它使该回路高频域的增益变小

当周期性目标值 $\gamma(t)(t)=\gamma(t)(t-h)$，控制误差 $e(t-h)=\gamma(t)(t-h)-y(t-h)$ 时，则输出 $y(t)$）逼近目标值的控制 $u(t)=u(t-h)+Ke(t-h)$，K 是校正增益. 其稳定条件为：

$$|1+G(j\omega)|>|R_B(j\omega)| \quad 0\leqslant w\leqslant\infty \tag{1-10}$$

其圆图半径将随 ω 而变化，在高频域时使 $|R_B(j\omega)|<1$，就有可能具有适当的稳定条件. 此外，$|1-R_B(j\omega)|$ 越小，定常偏差越小. 因此，实用上要求在主要的工作频域内，使 $R_B(j\omega)$ 尽量接近 1，所以滤波器 $R_B(s)$ 是决定重复学习控制系统跟踪频域与稳定性的重要的补偿器.

（二）反复学习控制

反复学习控制系统的一般框图如图 1-18 所示，图中 y_d 为有界连续期望输出；u_k 为第 k 次迭代参考输入，y_k 为闭环控制系统的第 k 次实际迭代输出（$k=1,2,\cdots,n$）. 可见经过第 k 次过程的学习，第 $k+1$ 次的控制输入为：

$$u_{k-1}=u_{fk-1}-u_{bk-1}=u_k+\Delta u_k-u_{bk-} \tag{1-11}$$

若受控对象动态过程为：

$$\begin{cases} x_k(t)=f(t,x_k(t),u_k(t)) \\ y_k(t)=g(t,x_k(t),u_k(t)) \end{cases} \tag{1-12}$$

误差：

$$e_k(t)=y_d(t)-y_k(t) \tag{1-13}$$

第 k 次学习的参考输入 $u_k(t)$ 和修正信号 Δu_k 合成作为第 $(k+1)$ 次学习的给定输入并存储，即：

$$u_{k-1}(t)=L(u_k(t),e_k(t)) \tag{1-14}$$

有：$e_k(t)\to 0$ 或者 $:y_k(t)\to y_d(k)$，当 $k\to\infty$，

$$(k-1)\leqslant t\leqslant kT \tag{1-15}$$

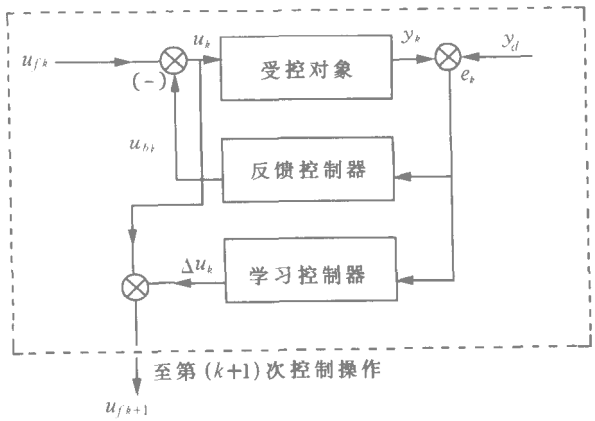


图 1-18 反复学习控制

智能控制除了上列这些领域以外，还有自组织控制（self organization control ）和最早在学习控制系统基础上，从工程控制论角度总结人工智能、自适应控制、自学习控制和自组织控制关系之后而逐渐形成的递阶智能控制（hierarchical intelligent control）等.

1.2 预测控制发展与早期研究

1.2.1 预测控制技术的进展

预测控制是一种基于模型的先进控制技术，亦称模型预测控制（model predictive control），它是 20 世纪 70 年代中后期在欧美工业领域内出现的一类新型计算机控制算法. 1978 年，Richalet 等在著名论文中，[1-16]首先阐述了这种算法产生的背景、机理与应用效果。预测控制的主要特征是：以预测模型为基础，采用二次在线滚动优化性能指标和反馈校正的策略，来克服受控对象建模误差和结构、参数与环境等不确定性因素的影响，有效地弥补了现代控制理论对复杂受控对象所无法避免的不足之处.

一、预测控制基本类型

预测控制在初期发展阶段，算法种类已相当繁多，但按其基本结构模式，大致可以分为三类：

(1)以非参数模型为预测模型的预测控制算法：有 Cutler 等人提出的[1-17]基于有限阶跃响应模型的动态矩阵控制（DMC－dynamic matrix control）和 Rauhani 等人提出的[1-18]基于有限脉冲响应模型的模型算法控制（MAC－model algorithmic control）. 这类非参数模型建模相当方便，只要通过受控对象的脉冲响应或阶跃响应测试即可得到，因而无需考虑模型的结构与阶次，系统的纯滞后必然包括在响应值中，因此特别容易表示动态响应不规则的受控对象特性. 正由于这些优点，目前商品化的预测控制软件包大多采用这类非线性模型，如 Sell 石油公司的 QDMC[1-19]和 Setpoint 公司的 IDCOM[1-20]软件包等，但其局限性较大，只适用于开环自稳定对象，且当对象时间常数较大时，势必模型参数增多，控制算法计算量大.

(2) 与经典自适应控制相结合的一类长程预测控制算法：有 Clarke 提出的受控自回归积分滑动平均模型(CARIMA－controlled auto-regressive integrated moving average) 的广义预测控制(GPC－generalized predictive control)；[1-21] 由 Lelic 等将频域的零极点配置方法与预测控制相结合，提出的广义预测极点配置控制（GPPC－generalized predictive pole placement control）[1-22]和由 Ydstie 与 De Keyser 分别提出的扩展时域自适应控制（EHAC－extended horizon adaptive control)[1-23]与扩展时域预测自适应控制（EPSAC－extended prediction self-adaptive control). [1-24]这一类基于辨识模型并且有自校正的预测控制算法，以长时段多步优化取代了经典最小方差控制中的一步预测优化，从而适用于时滞和非最小相位对象，并改善了控制性能和模型失配的鲁棒性.

(3)基于结构设计不同的另一类预测控制算法：有 garcia 等提出内模控制(IMC－internal model control)，[1-25]Brosilow 等人提出的推理控制（IC－inferential control)[1-26]和 Kwon 等人构造的基于状态空间的模型 (RHPC－receding horizon predictive control)，[1-27] 这类算法是从结构上研究预测控制的一个独特分支.

二、预测控制特点

预测控制算法发展至今，虽然有不同的表示形式，但归纳起来，它的任何算法形式不外乎包括：①预测模型，②参考轨迹，③在线校正，④目标函数为性能指标，⑤在线滚动优化等五个方面，并且具有如下几个特征：

（一）预测模型的多样性

从原理上讲，只要是具有预测功能的受控对象模型，无论采用什么描述形式，都可以作为预测模型。在预测控制中，注重的是模型功能，而不是结构形式，因此，预测控制算法改变了现代控制理论对模型结构较严格的要求，更着眼于根据功能要求，按最方便途径建立多样性的模型。

（二）滚动优化的时变性

预测控制采用的不是常规最优控制中固定的全局优化目标，而是在有限时域内的滚动优化策略。即在每一时刻对兼顾未来充分长时间内的理想优化和包含系统存在的时变不确定性局域优化目标函数，进行不断更新，而下一时刻是根据系统当前控制输入后的响应，这比在理想条件下，实现复杂对象的最优控制要现实得多。因此，滚动优化不是一次性离线运算，而是反复在线进行的，这种时变性，虽然在每一时刻只能得到全局的次优解，然而却能使由模型失配、时变与干扰等引起的不确定性，得到及时补偿，始终将新优化目标函数与系统现实状态相吻合，保证优化的实际效果。

（三）在线校正的鲁棒性

在预测控制中，把系统输出的动态预估问题分为预测模型的输出预测和基于偏差的预测校正两部分。由于预测模型只是对对象动态特性的粗略描述，而实际系统中通常存在非线性、时变性、模型失配与随机干扰等因素，因此，预测模型不可能与实际对象完全相符，预测模型的输出与实际系统输出间必然存在偏差。采用这种偏差进行在线校正，使系统构成具有负反馈环节的系统，从而提高了预测控制系统的鲁棒性。

上述三个特征，体现了预测控制更符合复杂系统控制的不确定性与时变性的实际情况。这是预测控制在复杂控制系统领域中得到重视和实用的根本原因。

1.2.2 预测控制的早期研究[1-50]

预测控制作为一种复杂系统控制的策略和方法，一开始就受到国内外控制界学者的关注，虽然预测控制的系统结构和算法研究在不断地发展，但就其早期研究已取得的成果来看，已在下列几方面得到充分体现。

一、预测控制的理论分析

理论分析包括解释预测控制的算法机理；推导预测控制系统的闭环传递函数；分析参数对预测控制系统稳定性、鲁棒性的影响及其定量关系；导出特定的模型失配（如增益、滞后失配等）下的鲁棒性界限；通过对闭环预测机制的分析，在一般意义上解释其鲁棒性优于传统最优

控制的原因. 1987 年 Clarke、Mohtati 和 Tuffs 从 CARIMA 模型出发导出了广义预测控制算法，并对该算法原理进行了阐述. 此后，我国学者在广义预测控制的算法改进、控制器设计与应用方面，做了不少工作，[1-28～1-37] 并从线性对象的阶跃响应出发，导出了在预测空间设计数字控制器的新方法，阐明了预测控制的理论背景，讨论了控制回路的结构、参数整定及算法实现，把广义预测控制转化为内模控制结构，导出了其中控制器、滤波器的定量表达式，并在此基础上，分析了系统的闭环动态特性、稳定性和鲁棒性，为设计广义预测控制器提供了理论依据.[1-38～1-45]

二、算法的改进与推广

对已有基本算法作性能上改进，如导出递推算法，采用控制间隔的多步预测，引入扰动观测器，采用变反馈校正系数等；修正目标函数，把单变量的算法推广到多变量的算法. 如 1987 年 Kinnaer 提出了输入输出维数相等的多变量广义预测控制，[1-46]把仅适用于稳定对象的算法推广到非自衡对象；把预测控制的适用范围推广到非线性对象及分布参数系统，在非参数模型预测控制中引入自校正机理，实现了模型在线辨识和控制策略的在线校正，在广义预测控制中引入自学习机理，以适应对象和环境的不确定性；Cloud 和 Kouvaritakis 把多变量特征轨迹法和单变量预测控制相结合，于 1988 年提出在特征结构下的广义预测控制算法，[1-47]此后吕剑虹等人在此基础上提出的特征结构下多变量预测控制系统的闭环反馈结构，可有效地减少计算量及所需的存储空间，并可方便地判别此类系统的闭环稳定性.[1-48] 为了减少计算量，A. Pedro等人于 1984 年应用离散时间状态空间和差分方程相结合，针对确定性系统提出了一种新的广义预测控制，避免了 Diophantine 方程的在线计算；[1-49]袁著祉等以随机系统为基础，对于具有有色噪声干扰的系统，提出了一种新型预测控制器的设计方法，并考虑了滤波、控制加权的影响，具有计算量小、对非最小相位系统和非自衡对象有较好的控制效果和较强的鲁棒性的特点.[1-36]

三、算法比较与分析

这部分内容包括比较预测控制算法与 PID(proportional integral derivative)、LQG(linear quadrative gaussian self-tumer)、STR(self-tuning regulator) 等控制算法效果；分析预测控制与某些控制算法，如最少拍控制、离散最优控制；Smith 预估等之间的关系；比较不同的预测控制算法，如 DMC,MAC,GPC 和 EHAC 等在模型与控制策略上的异同，评价它们的控制效果.

1.3 现代预测控制及研究动向

近几年来，预测控制的研究和发展，已经突破早期研究的框架，摆脱了单调的算法研究模式，从而开始了与极点配置、自适应控制、鲁棒控制、精确线性化、解耦控制和非线性控制相结合的一类先进预测控制策略研究；并且随着智能控制技术发展，预测控制也将向着智能预测控制方向发展，如模糊预测控制、神经元网络预测控制、遗传算法预测控制，以及自学习预测控制等；并将人工智能、大系统递阶原理等引入预测控制，构成多层智能预测控制的模式，由此，进一步增强了预测控制处理复杂对象 (complex plant) 、复杂任务 (complex task) 和复杂环境

(complex environment)的能力，并拓展了预测控制综合目标和应用领域.

1.3.1 先进预测控制技术及研究动向

先进预测控制技术，是指在预测控制早期研究成果的基础上和近几年发展起来的各种先进控制策略(如 1.1.2 节所述）相结合，研究与发展起来的一类预测控制新算法.

一、极点配置预测控制

由于预测控制的基本要素是多步预测、滚动优化和校正反馈，因此，系统的闭环特征多项式的零、极点位置与控制器的多个可调参数有密切关系.要在控制器参数设计和闭环系统动态特性之间找到定量关系是十分困难的，如果控制器参数选择不当，会使系统控制性能不佳，甚至导致系统不稳定.早在 1987 年 Lelic 等人就提出了广义预测极点配置控制器，[1-51]将极点配置和多步预测结合，利用控制器的参数进行闭环极点配置. Visser 和 Peng 等人基于参数模型，在目标函数中引入加权多项式，在导出系统闭环特征多项式的表达式之后，通过选择加权多项式的参数来配置极点，[1-52～1-56][1-30] 他们给出的求解极点配置方程的递推形式，减少了在线计算量，提出了自适应算法；[1-57]对输入输出信号赋予指数加权因子，将变换后的信号用于广义预测控制，实现闭环系统的区域极点配置，使闭环系统有期望的稳定度.[1-58]

此外，还有通过对系统输入输出信号和参考信号进行滤波，并部分配置闭环极点[1-59,1-60]和使用 υ 算子，给出适用于快速过程的极点配置方法.[1-61]

二、解耦预测控制

解耦预测控制是一类在多变量系统解耦基础上的预测控制算法研究.尽管 Garcia C.E 等人[1-25]曾经认为，对于具有多重时滞的多变量系统，实现完全解耦的控制，其系统不一定具有最优的控制性能.但对为了简化多变量系统预测控制器的参数整定，以降低控制系统的最优性能为代价来实现的解耦，似乎还是有价值的. 在解耦预测控制方面已经发表的文章，有通过分散化和关联预测，得出一种建立在解耦基础上的多变量 DMC 设计方法；[1-60]有基于前馈解耦控制方法提出一种广义预测控制算法[1-63]和基于多输入多输出模糊控制器的模糊解耦原理基础上的广义预测模糊控制；[1-64]文献[1-65]也探讨了预测控制的解耦性能.

三、前馈补偿预测控制

前馈补偿预测控制系统目前主要有：在预测控制系统中，引入前馈补偿器、构成前馈通道，来抑制扰动的具有扰动前馈补偿功能的预测控制算法；[1-66,1-67]用前馈补偿器实现系统解耦的前馈解耦广义预测控制算法.[1-63]

四、自适应预测控制

预测控制和自适应控制结合构成一类自适应预测控制器.自适应预测控制有多种方法，如将模型预报误差作为平稳随机序列，用最小二乘法在线辨识自回归滑动平均模型(ARMA－auto regressive moving average),[1-68,1-69]有的是简化在线计算，或直接辨识控制器参数,[1-36,1-70]避免求解 Diophantine 方程或采用特殊的加权矩阵，[1-32]避免在线求逆；有的采用鲁棒性更强的模型，如广义受控自回归滑动平均模型(GCARMA－generalized controlled auto-

regressive moving average)、[1-71]δ^{-1} 模型、状态空间模型[1-72]等；有的利用稳定性和鲁棒性研究成果，提出自适应 CRHPC 算法、[1-73,1-74]自适应 SIORHC 算法[1-75]和用 MVSMAR 方法构造的隐式自适应算法.[1-75,1-76]此外，还有将 series parallel identification model 用于自适应内模控制中.[1-77]

五、鲁棒预测控制

目前，在预测控制的鲁棒性研究中，较多的是将鲁棒控制的一些方法引入预测控制，构造新的鲁棒预测控制，以提高结构型建模误差的鲁棒性. 主要有将 LQG 中的回路传输补偿技术(loop fransfer recovery) 用于连续系统的预测控制；[1-78]有将(LMI — linear matrix inequalities) 技术用于针对线性时变系统的预测控制；[1-79]有用 MUSMAR(multi-step multi-variable adaptive regulation) 方法构造一种带约束的鲁棒预测控制；[1-76]有将 H 控制中的 Min-max Formulation 用于鲁棒预测控制的构造，[1-80~1-84]这种控制算法的目标函数采用无穷范数，一般用线性规划的方法求解，[1-85]也有用有限次最小二乘法解超定线性方程组的方法来求解的.[1-86,1-87]此外，还有鲁棒内模控制等算法.[1-88~1-90]

预测控制和各类先进控制相结合，构成新一类先进预测控制的类型很多，除上述列出的几种以外，还有基于最小方差控制的自校正预测控制，以及与串级控制相结合的预测控制，用于工业串联系统和大系统的预测控制等，这里不再一一赘述.

1.3.2 智能预测控制策略及研究动向

智能预测控制是针对复杂的受控系统，采用某种智能控制策略与典型的预测控制算法相结合构成的一类智能型预测控制系统，它弥补了单纯预测控制算法在性能上精度不高，仅适用于线性系统，缺乏自学习、自组织功能，鲁棒性不强的缺陷，达到了日益提高的控制性能要求. 这类智能预测控制，目前多数在：①建立智能型预测模型；②构成高层采用智能控制策略，低层为预测控制算法的多层结构控制系统这两方面展开研究，特别是近几年正成为预测控制系统研究热点.

这类智能预测控制主要有以下几种：

一、模糊预测控制

模糊预测控制是基于预测控制算法基础上，引入模糊控制机理，最早是由日本学者安信等提出的，并成功地应用于地铁的列车运行控制上. 我国学者近几年在这方面也取得了不少研究成果，如将模糊辨识和广义预测控制相结合，提出了一种基于辨识模糊模型的多变量预测控制方法，其中离散模糊模型是由几条模糊规则组成的规则库来表示的，模糊辨识包括结构辨识和参数辨识两部分，广义预测控制器采用线性系统的设计方法实现.[1-91]有以预测模型对控制效果进行预报，并根据目标偏差和操作者的经验，应用模糊决策方法，进行在线修正的模糊预测控制算法，[1-92]必要时也可以在线修正预测模型；有的在生物医学工程领域的肢体外循环系统中，设计了一种带预测的参数自寻优模糊控制. 此外，基于智能控制系统的多层结构，在系统高层引进模糊控制器，使得原广义预测控制的开环链变换成由系统实际输出与参考轨迹相比较的闭环控制系统，并利用多变量模糊控制器的结构解耦原理，使广义预测控制算法本身最大限度地减少了控制域长度，大大减少了计算工作量，提高了系统控制的实时性，改善了原广义预