

适应控制综述

C. C. Hang (康长杰) T. H. Lee

(Dept. of Electrical Engineering National University of Singapore)

摘 要

对于适应反馈控制已研究了各种实用的开环方案(增益计划设定等)和闭环方案(模型参考,自校正,模式识别等)。这些方案是用以克服过程中大的变化或动态干扰而造成的问题。本文从应用观点综述适应控制的各种方案。讨论了用基准试验进行性能比较评定的必要性。最后,综述了新涌现的专家系统和基于知识控制可能做出的贡献。

关键词 适应控制, PID 调节器, 基于知识控制。

一、引 言

在过程的动态特性中存在未知的负载干扰或不确定性时,自动控制反馈的基本功能是在它的设定点维持过程输出。当干扰或过程动态特性的不确定性太大时,反馈控制器的性能就变得难以接受,这时就需要适应控制。

适应控制器可以看做是一个附加的控制环节,该环节调节反馈控制器的参数,以保证在过程或干扰有很大改变时系统的动态性能量度,如阻尼和带宽能满足系统要求。在实践中,随着过程操作条件的变化,为了确保最优控制器性能,控制器的参数需定期反复调整。因此,从另外的观点来看适应控制,是完成控制器参数不断地自校正的机构。

由于适应控制系统是由高度非线性、时变的动态方程来决定的,人们很难去分析和研究它们的稳定性和收敛性。在过去的二十五年里,绝大多数研究论文和发表的文章都是关于这两个课题的^[1],现在这方面已经成熟。关于适应控制的教科书已容易得到^[2,3]。此外,近几年微计算机/微处理器的出现,极大地推动了适应控制器的实现^[4]。在实现适应控制器中所积累的经验,理论上的深入,使我们能开发更鲁棒(robust)的设计算法,当存在未建模型动态和负载干扰时,可用改进的保护逻辑来提供鲁棒适应控制。

二、开环适应控制 (OLAC)

可用开环或闭环适应技术来完成适应控制^[1]。图1给出了开环适应控制(OLAC)方案,在实践中常称它为增益设定控制。根据环境的改变,对与过程参数变化密切相关的如速

度、高度、流量等进行测量,并根据查表得到的数据来调整动态控制器的参数^[5-7]。OLAC 的主要优点是高速适应性和良好的稳定性。不象闭环方案那样,OLAC 没有动态适应环节,动态适应环节会降低适应速度,并且面对变化的操作条件会引起复杂的稳定性问题。只要多加关照,OLAC 也可以用来控制非线性过程,即把非线性过程看成参数随可测参考变量而变化的线性系统处理。

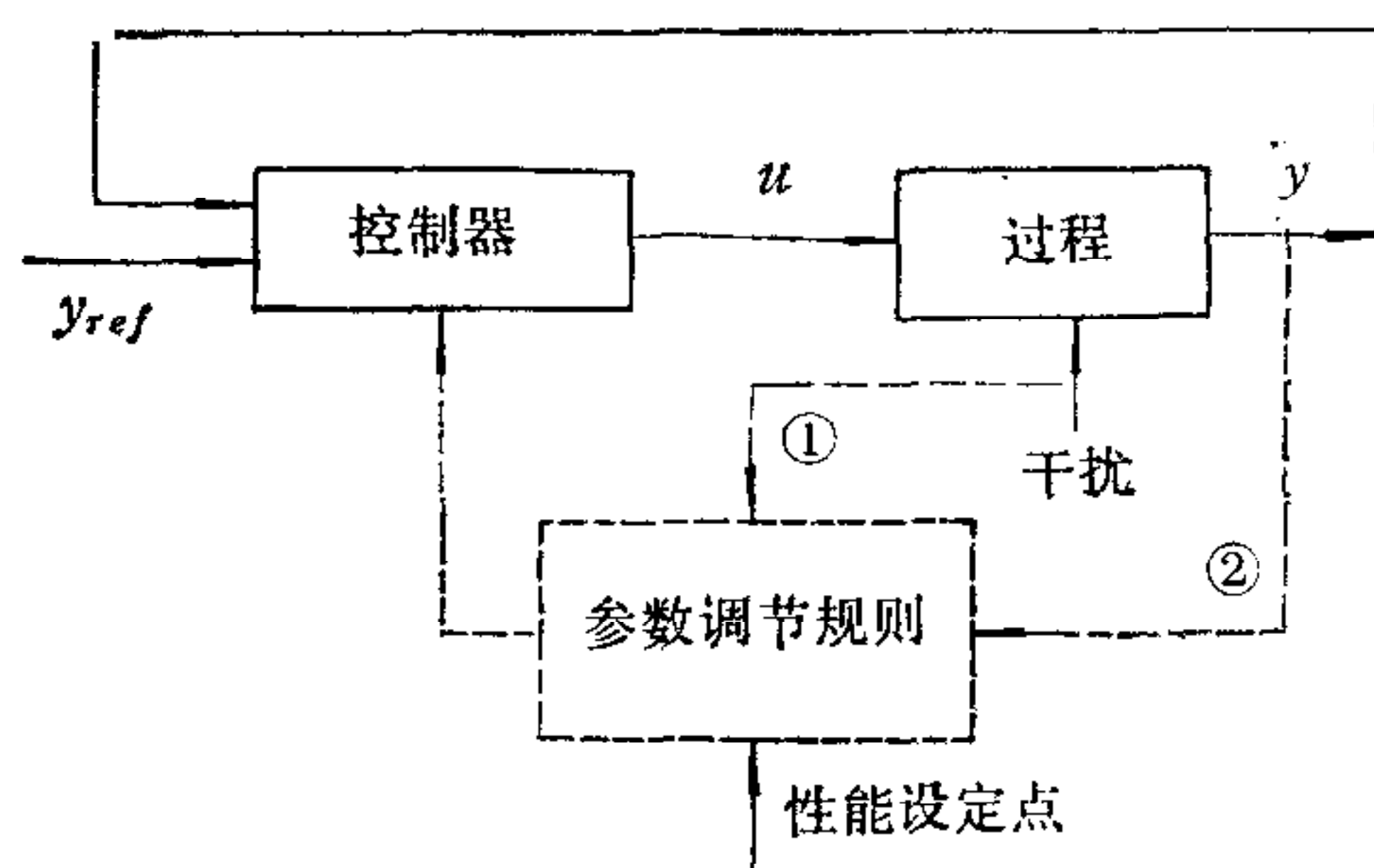


图 1 适应反馈控制 (1) OLAC, (2) CLAC

校正的 PID 调节器上。以容器液面的 OLAC 为例,如果把固定的控制参数调定在 30% 液位上,由于采用高裕量,而使得开环增益增加,因而在高液位点,液位控制系统将发生强烈振荡。因为 OLAC 中把液位变量作为增益设定参考量,系统响应几乎不随时间变化响应。容器液面也可由闭环适应控制系统来控制,这时增益设定将被参数刷新方案取代。但是必须考虑适应响应的动态特性以及失稳的可能性,这样会使总的控制系统变得更复杂。

由于 OLAC 比较简单,性能好又有鲁棒性,在可用 CLAC 的场合应优先考虑 OLAC。但对于一个新的过程,可以首先使用 CLAC。随着过程知识库的建立,逐步改进为 OLAC 也是可行的办法。在一个复杂的控制问题中,也可以把 OLAC 与 CLAC 结合使用。在下述情况中,这种办法是特别有用的:只知道部分过程知识,内部用 OLAC 起作用,尽管其作用不那么完美,当外部过程动态特性有较大变化时,就采用总体的 CLAC 来克服残留的动态特性的变化。

三、闭环适应控制 (CLAC)

当开环适应控制技术行不通或无效时,当过程或干扰动态特性在大范围变化时,闭环适应控制 (CLAC) 技术就可以用来维持所要求的控制环特性。如图 1 所示,在 CLAC 中,测量实际性能并与所要求的性能加以比较,然后用测得的偏差来调节控制器参数去消除误差。CLAC 的主要设计问题是确保可调参数的收敛性、整个系统的非线性/时变系统的瞬态稳定性^[1]。其他问题包括在过程或干扰模型的结构方面需要有充分的激励及更多的先验信息^[2]。所以 CLAC 比 OLAC 更为复杂^[6,7]。

CLAC 方法既可以连续地用在关键性的场合,也可以在装置执行规定任务或进行定期调定时作为控制器参数自动校正的手段。随着基于知识控制的出现,CLAC 技术在将来会更容易使用。为了对付困难的控制问题,常常有意地把过程设计得容量较大而动

OLAC 的主要局限性是它需要确定和测量增益设定参考变量,并且需要经常刷新查找表。现有的技术由于能提供可靠而价格性能比高的传感器,促进了 OLAC 的发展,微处理器使得查找表的自动运转及刷新易于实现。例如,现在已把 OLAC 的特性作为一个标准功能,用在由 Sattcontrol 和 Fisher Control 制造的两种自动

态特性又过于稳定或迟缓,以便易于采用手动控制或普通的控制技术。用 CLAC 就能使装置体积小,速度快,因而可以节省成本。

传统上把 CLAC 分为两个主要类型^[1-3],即模型参考适应控制 (MRAC) 和自校正调节器 (STR)。

3.1. 模型参考适应控制 (MRAC)

在一个模型参考适应控制 (MRAC) 系统中,所需的动态性能是以参考模型方式确定的^[3]。如图 2 所示,模型与过程输出之间的差被用来作为调节调节器参数。当被控对象由一阶线性系统建模后,参数调节律是相当简单的。此时,可调控制器增益 K_c 由下列适应律来决定:

$$\dot{K}_c = -\alpha y(y - y_m), \quad (1)$$

其中 u_c 为指令输入, y_m 为模型输出, y 为过程输出,如图 3 所示。增益 $\alpha > 0$ 影响适应的速度,在设计时,对 α 的选择应兼顾所需的适应速度和系统噪声灵敏度。从方程式 (1) 可见整个适应控制系统实际上是非线性的,通常需要专门的理论分析。本文将以一阶线性装置的适应控制为例来说明这种情况。假设被控装置由下式来控制:

$$\dot{y} = a_p y + u, \quad (2)$$

装置的参数 a_p 是未知的(即装置是未知的)。对于控制对象,一个控制系统必须设计成这样:装置输出 y 必须跟随一个有界的参考模型,输出 y_m 及在过程中适应系统的所有信号,必须仍是有界的。参考模型为

$$\dot{y}_m = a_m y_m + u_c, \quad (3)$$

其中 u_c 是一个有界参考指令信号, $a_m < 0$ 确定了(稳定的)参考模型动态特性。对于这个系统,全局稳定适应控制器由下列控制律给出:

$$u = k_c y + u_c \quad (4)$$

及适应性控制律

$$\dot{k}_c = -\alpha y(y - y_m). \quad (5)$$

为了证明全局稳定性及渐近跟踪,注意到误差信号定义为 $e \equiv y - y_m$, 误差动态特性是

$$\dot{e} = a_m e + \tilde{k}_c y, \quad (6)$$

其中 $\tilde{k}_c = k_c - (a_m - a_p)$ 是参数误差项。把李雅普诺夫函数设为

$$V(e, \tilde{k}_c) \equiv \frac{1}{2} e^2 + \frac{1}{2\alpha} \tilde{k}_c^2. \quad (7)$$

不难证实二次型 V 满足正定、渐减的及幅向无界的要求。在整个适应系统内,考虑 V 对时间的导数,得

$$\dot{V} = e\dot{e} + \frac{1}{\alpha} \tilde{k}_c \dot{\tilde{k}}_c$$

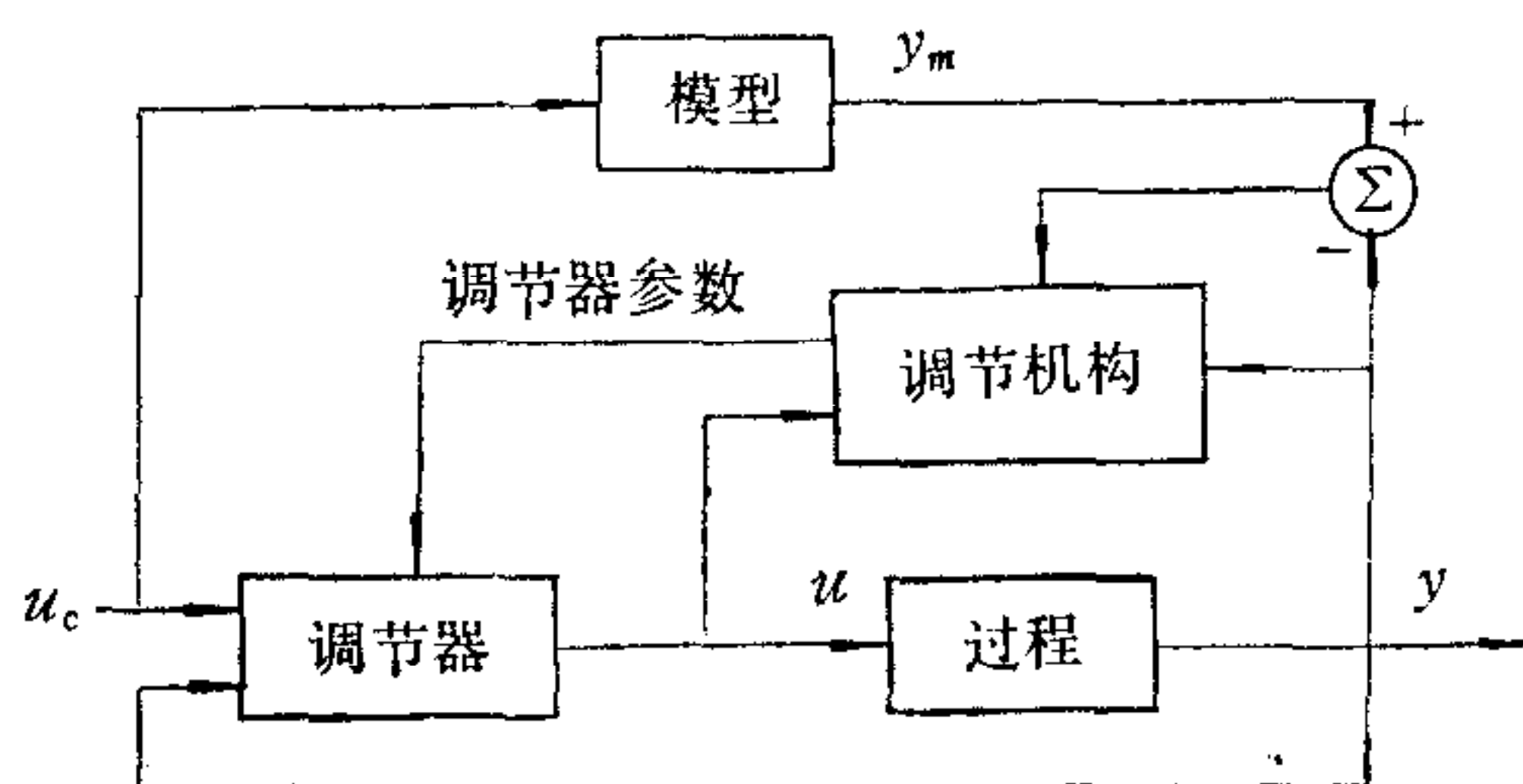


图 2 模型参考适应控制

$$\begin{aligned}
 &= a_m e^2 + \tilde{k}_c y e + \frac{1}{\alpha} \tilde{k}_c (-\alpha y e) \\
 &= a_m e^2.
 \end{aligned} \tag{8}$$

因为 $\tilde{k}_c = \dot{k}_c$ (实际上, 这是适应律设计的依据) 由于 $a_m < 0$ 确定了(稳定的)参考模型极点. 于是, 在 (e, \tilde{k}_c) 空间的, \dot{V} 显然是负半定的. 因为 e 和 \tilde{k}_c 组成了系统的完全等价的状态变量, 从而保证了一致稳定性及 e 和 \tilde{k}_c 的一致有界性, 从以上的分析及一些深入的处理有如下性质:

- i) $e(t) \in L^2[0, \infty)$, 或 $e(t)$ 是平方可积的;
- ii) $\dot{e}(t)$ 一致有界.

这两个性质共同保证了

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0, \tag{9}$$

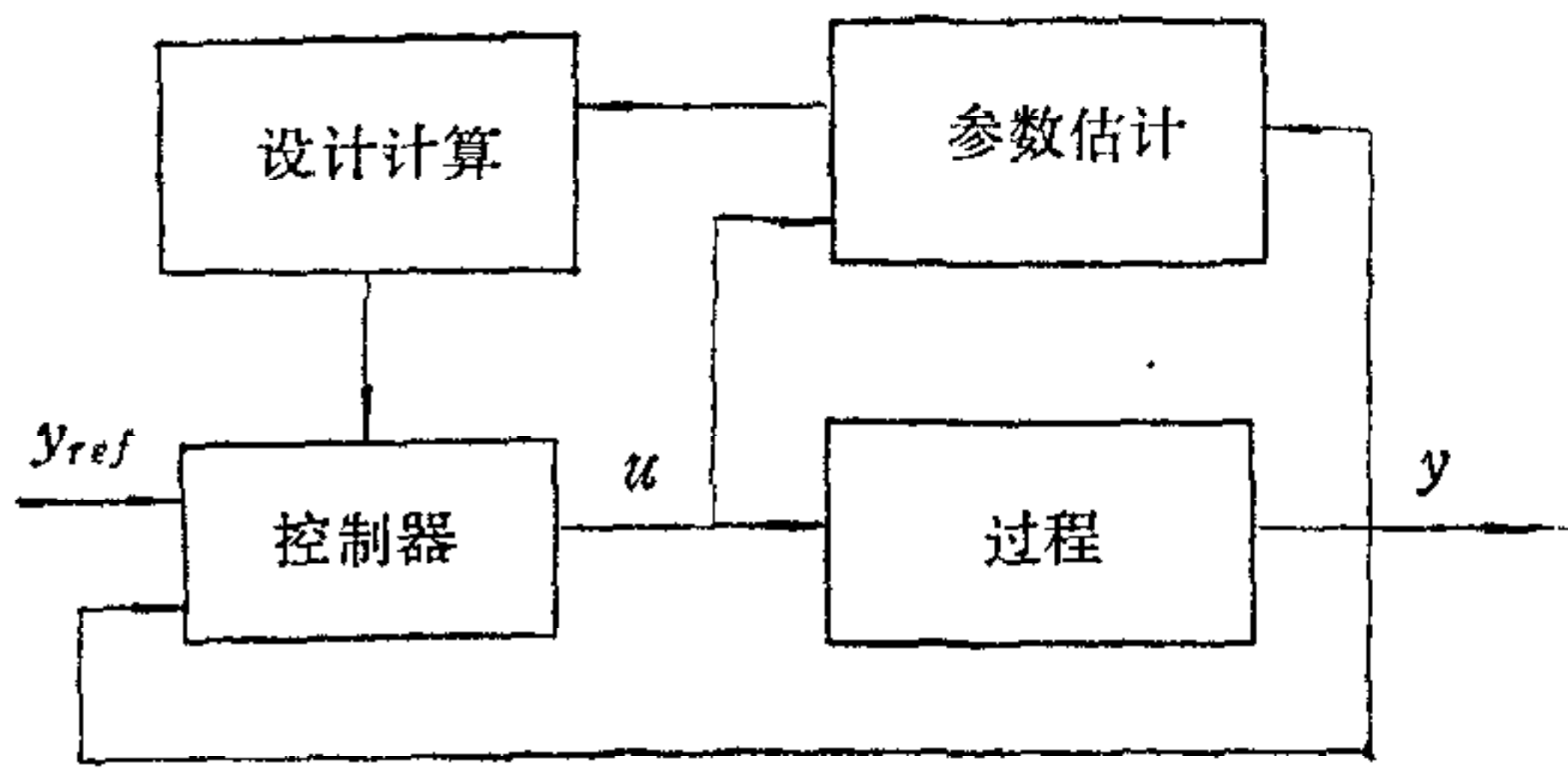


图 3 自校正调节器

这便是我们对适应控制系统所希望的性质: y 渐近跟踪 y_m . 对全局稳定性及渐近跟踪的上述分析是相当典型的. 对于高阶系统, 这种分析变得相当复杂.

当假设这个过程只是一阶时, 方程式(1)表现了 MRAC 适应算法的最简单形式. 对高阶过程, 其中只有输入及输出可测量, 其适应算法必然复杂得多

并需要用所谓的增强误差信号(augmented error signals)^[1-3]. 一般来说, 整个适应系统的稳定性及适应速度很大程度取决于外界干扰的存在, 外界信号的充分激励, 非最小相位零点及非模型的动态特性. 由于这些复杂原因, 现在 MRAC 大多数已成功地应用于电气驱动. 船舶自动导航及其他动态特性阶数较低的伺服机构^[1-3]. 对于直流马达位置控制器^[8]则有出色的性质.

3.2. 自校正调节器

在显式自校正调节器中 (STR), 过程参数是由估值器辨识的, 其结果用来设计或计算控制器参数, 如图 3 所示. 估计算法如递归最小二乘法已众所周知^[2], 可用 MATLAB 软件包作为工具. 过程模型的结构及某些先验信息象空载时间. 模型的阶数等都是需要的. 除此之外还需要一些附加条件, 如充分激励. 过程动态特性的慢变化等来保证 STR 的良好性能. 在特殊情况下, 问题也可程式化, 例如可以表述成不包含控制器设计计算的形式, 此时由估值器直接给出所需的控制器参数, 这便是所谓的隐式 STR, 它类似于 MRAC, 因此也具有在 3.1 节所讨论的同样优点与局限性.

象所有的基于模型的控制器一样, 显式 STR 的应用相当广泛, 例如极点配置, Smith 预测器, 广义最小方差控制, 广义预测控制 (GPC)^[8,9] 都可以应用. 在显式方案中可变空载时间及非最小相位零点的处理也比较容易, 推广到多变量系统也很简便, 特别是对于极点配置和 GPC 控制器更是如此. 在文献[1,2]中介绍了许多工业应用实例.

以自校正 GPC 控制器^[9]控制的适应热交换器为例, 在前 300 个采样中, 系统开环, 进行参数估计(利用递归最小二乘算法). 在第 300 次采样时, 用温度设定点把环闭上, 两

个环的温度设定在 67.5°C 。为了试验用适应性 GPC 控制器所提供的自校正性能的效果, 附加设定点改变。由实验结果知在所有情况下适应性 GPC 提供良好的设定点响应。此外, 还对从顶环到底环的交互影响提供了有效的解耦。

在实用上对 STR 的进一步改进是引入双速技术 (dual-rate technique)。它允许在线参数估计中使用大的采样间隔, 这将确保用一个降阶模型而在估计上取得良好的鲁棒性, 使计算在数值上更稳定而且计算量也不太大。如果负载抗干扰性能较好, 这种技术还能允许同时使用小采样间隔, 若开环过程阻尼特性很差, 这就显得格外重要了^[10]。已经成功地开发了双速自校正 Smith 预测器^[11]及双速自校正极点配置控制器^[10]。

四、模式识别方法

对于 PID 调节器的特殊情况, MRAC 和 STR 都不太合适去适应它的参数, 此时数字 PID 调节器采样速率非常快, 而控制器的结构只限于有两个零点和两个极点。然而关于手动调节 PID 参数已有现成专门知识可资使用。只要用微处理器就可以很好地利用这些专家经验。在 80 年代早期 Foxboro 公司已在市场上推出基于模式识别的称为 EXACT 的适应性 PID 调节器^[12-14]。其基本原理非常简单, 如图 4 所示, 无论何时出现大的设定点或负载变化, 就对瞬态误差响应加以监视, 并计算阻尼作用的量度和超调量。然后把 PID 参数调节到满足预定的阻尼和超调标准。为了确保出现噪声时的鲁棒性, 考虑负载干扰和其他种种实际困难, 必须引入大量的启发式知识。EXACT 的最新版本已用了超过 150 条以上的规则。EXACT 的适应性控制已成功地应用于广泛的工业装置上^[12]。近来, 其他公司如 Yokogawa 也开发了基于模式识别的自校正 PID 调节器。

模式识别的 EXACT 型的 CLAC 的优点在于应用上的简单性。如同 MRAC 及 STR, 用户不必设定先验信息如空载时间、模型的阶、时间标度等。因为, 或者不需要或者只要用简单的预校正测试或不需测试, 就能自动地设定。它处理空载时间的大变化, 要比 MRAC 与 STR 好得多^[13,14]。主要缺点是由于需要大量的启发式规则而造成设计上的复杂性。当前它仅局限在 PID 调节器的自校正。对于下列情况它的性能也较差, 系统存在正弦干扰^[14], 非最小相位动态特性^[16]及多变量交叉耦合^[17]的情况其性能较差。

若要使 PID 调节器能自动校正或自校正, 模式识别只是若干可行方法中的一种。例如, 继电自动校正器 (relay auto-tuner)^[1], 基于相关度 (correlation-based) 的自动校正器^[15]及近来由 Åström 和 Hägglund^[18]所介绍的新的自校正 PID 调节器都能使用。继电自动校正器用一个继电来产生受控的自振荡, 由此即可在乃氏曲线上定出一个点, 并用以计算最优的 PID 设定以满足对增益及相位裕量的要求。其优点是校正时间很短。基

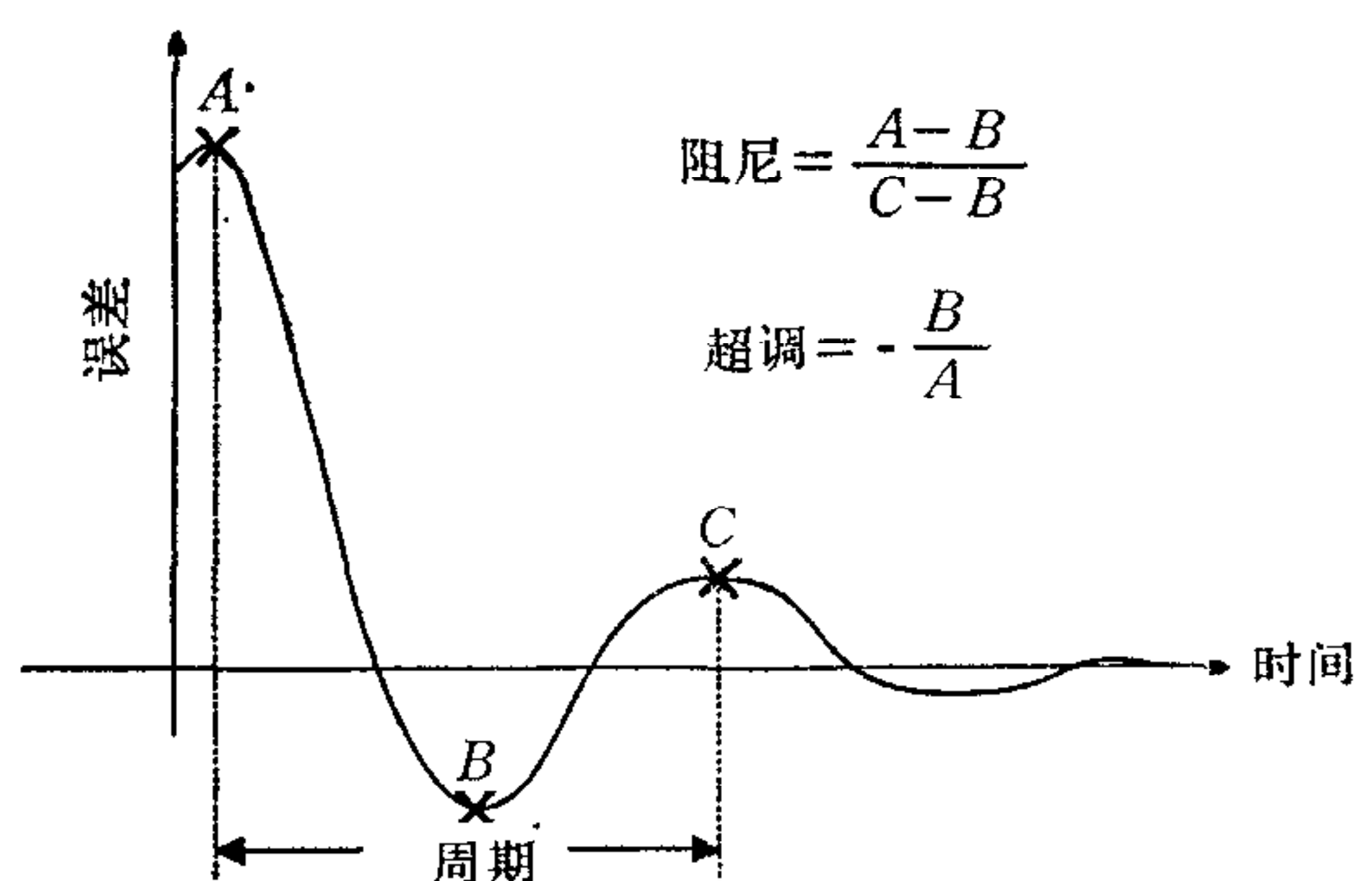


图 4 基于模式识别的 PID 自校正器的误差响应

于相关度的自动校正器利用二进制伪随机序列的输入与过程输出间的互相关度 (cross-correlation) 来识别最大增益和相位, 并用于 Ziegler-Nichols 校正公式。其主要优点是能用于噪声很强的环境。Åström 和 Hagglund 的新型自校正 PID 调节器使用狭带通滤波器来产生信号去辨识乃氏曲线上的点。其优点是能连续而快速地适应变化的动态特性。所有这些方法也有与 EXACT 同样的优点, 不需要什么关于过程先验信息。而且它们在实现起来也比较简单, 它们将是模式识别方法的竞争者。

五、性能比较

Foxboro EXACT 继电自动校正器及基于相关度的自动校正器三种产品的有关性能均不相同的, 因此这些自动校正器和自校正器的有关功能和可能的局限性的研究也是很重要的课题, 并已开始受到重视^[16-20]。

近来^[16]提出了利用基准试验对自动校正性能特性进行系统的、综合的评价。推荐了过程动态特性的一个宽裕的有代表性的范围, 并介绍了关于静态和随机的负载干扰的情况。已经发现两组定量性能判据, 即最终的校正瞬态(设定点和负载)响应的积分平方误差和重新校正控制器所需要的时间, 能为自动校正性能提供很有内容的重要指示。虽然继电自动校正器从校正响应的积分平方误差来看并不那么好, 但它的重新校正时间最短。文献[7], [16]又提出了一种基于微控制器的过程模拟器, 把一台个人计算机通过若干通道与模拟器相连, 用软件命令即可使过程动态特性变化。这种装置的建立提高了基准试验过程, 数据记录及试验结果归档的自动化程度。

六、基于知识的控制

使用 MRAC 和 STR 时, 用户必须具有相当多的先验信息, 这就限制了它们的应用。

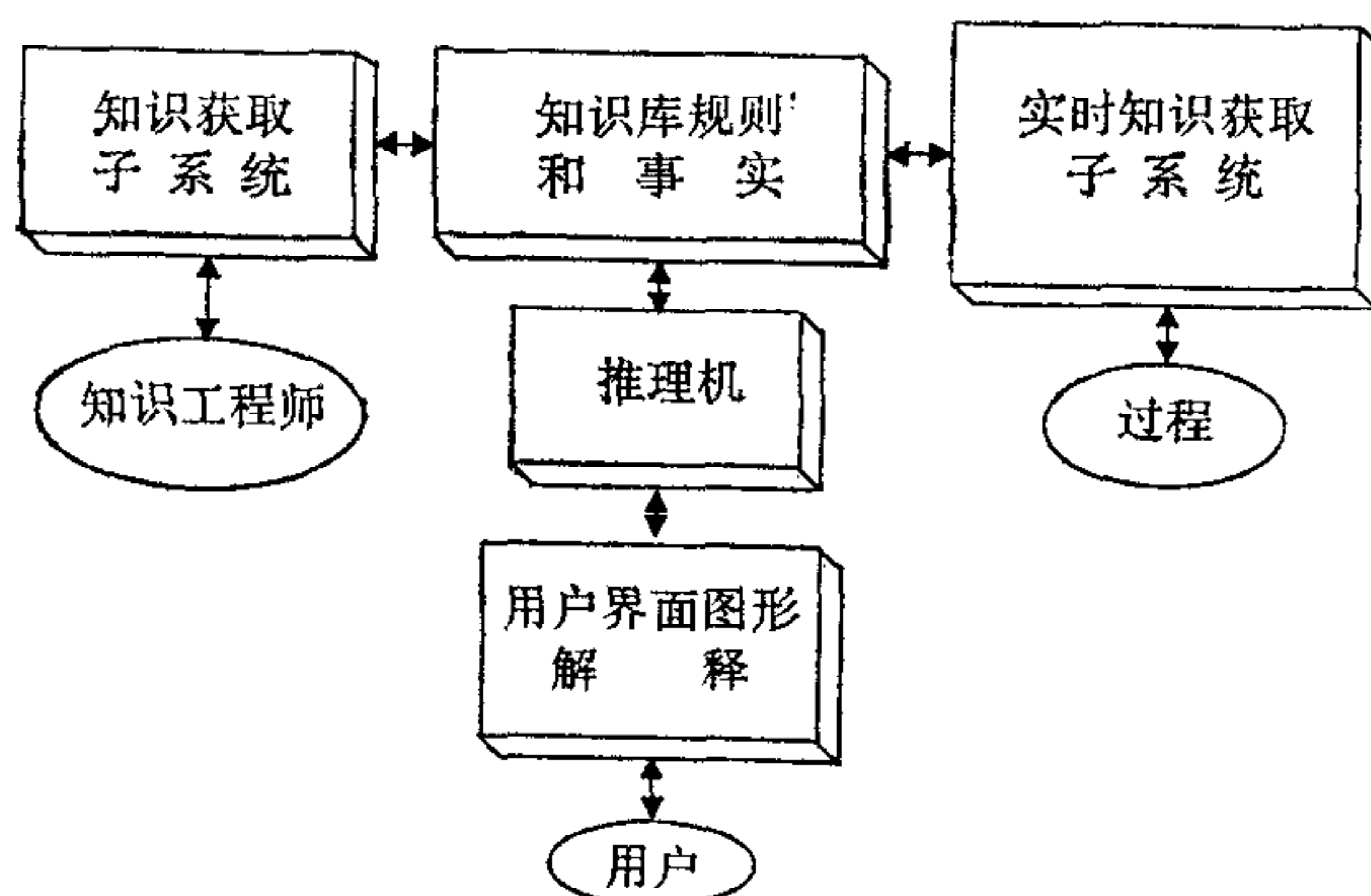


图 5 基于知识的专家系统

这些控制器的实际鲁棒性问题就需要进一步开发更多启发式逻辑和保护逻辑, 例如处理周期负载干扰^[17]以及双速采样技术^[11], 使得 Åström^[24]提出了用专家系统来简化把启发式逻辑结合进数字计算的强化算法。称这种新方法为专家控制或基于知识的控制。

基于知识的专家系统的结构如图 5 所示。是与过程控制, 控制算法及有关的启发式逻辑的深层知识分开的控制知

识库的建立。根据输入输出数据(必要时用探测信号嵌入过程), 在线地建立过程知识库。推理机将激活知识库中所包含的产生式规则。这种实时专家系统方法的主要优点是: 大大地简化了基于知识控制系统的开发, 此外还提供了解释器, 它使工程师能对系统所采取的或所推荐的操作提出质询。

基于知识的控制的出现也促进了更多的智能进入控制器。例如, 现行的适应控制器需要工程师输入有关装置的先验信息。它们也不能自我诊断来鉴别 PID 控制是否适用, 若不适用, 应该使用什么样的先进控制算法。如图 6 所示的基于知识的控制器将提供足够的智能去做下列工作:

1) 在冷启动或从长时间关闭中恢复工作期间, 执行继电自动校正实验来获得 PID 调节器的最优参数以及主要过程知识, 并以此对系统辨识/适应控制加以初始化;

2) 在这一步后或热启动期间, 过程将由 PID 调节器来控制, 并引入一种非干扰型的试验信号来检测时变动态特性的存在;

3) 根据操作者的选择, 系统可以定期地连续地或周期地连续地进行校正 PID 调节器, 或使系统切换到高级控制方式;

4) 如能实现先进控制, 一种合适的自校正算法将被激活来实现自动的试运转或继续自校正。开发这样的基于知识控制器需要一些关于 PID 控制何时失效, 何时才必须采用先进控制器的基本知识(例如 Smith 预测器或极点配置控制器)。这已成为现行研究的主要课题^[22]。

基于知识控制方面的研究已经超出了根据规则和算法分类而简单地建立控制知识库的范围。使用规范化空载时间或最终极增益来刻画过程动态特性的类别, 对于这种过程可采用 PID 控制和 Ziegler-Nichols 调解规则。对于这一类过程动态特性, 已经提出了新的相关度公式 (correlation formulae) 用以消除手动微调^[23], 并引入关于设置点权重的新函数^[22]。除了这类过程动态特性外, 已推导出新的校正公式来补充 Ziegler-Nichols 公式^[24]。

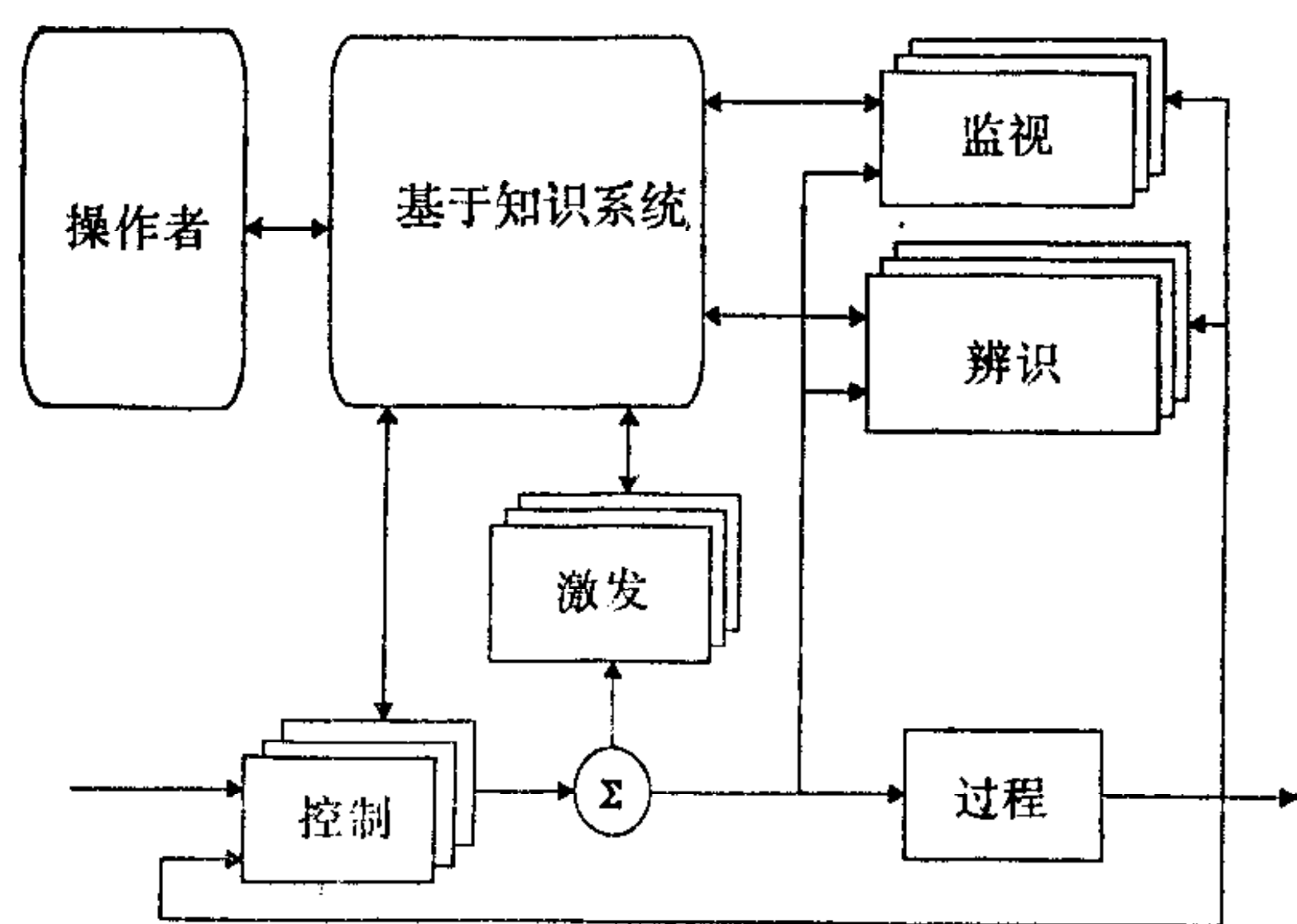


图 6 基于知识的控制器

七、结 论

适应过程控制已成为实用的工具。关于适应控制理论和设计方法已有现成的教科书, 已有大量商业化产品可用于自动校正和适应控制。用户反馈来的信息, 将不断提供鲁棒性能改善的研究思想, 并进一步推广到存在多变量及非线性动态特性的更复杂的场合。基于知识控制的出现为适应控制在工业上的广泛应用提供了新的希望。

参 考 文 献

- [1] Astrom, K. J. Adaptive Feedback Control, Proc. of the IEEE, 75(1987), 2, 185—217.
- [2] Astrom, K. J. and Wittenmark, B., Adaptive Control, Addison-Wesley, 1989.
- [3] Narendra K. S. and Annaswamy, A. M., Stable Adaptive Systems, Prentice-Hall, 1989.

- [4] Astrom, K. J., Automatic Tuning for Precise Process Control, *The Saab-Scania Griffin Journal*, 1987, 30—38.
- [5] Andreiev, N., A process Controller that Adapts to Signal and Process Conditions, *Control Engineering*, Dec. 1977, 38—40.
- [6] Hang, C. C. and Yap, E. L., A Microcomputer-based Process Control Training Simulator, Proc. Instrument Asia Conf., Nov. 1982, 15. 1—7.
- [7] Hang, C. C. and Sin, K. K., Training Simulators for Advanced Process Control, Proc. Instrument Asia Conf., Singapore, May 1989, 4.25—35.
- [8] Lim, B. C. Lee, T. H. and Chan, S. K., A Microcontroller-based Adaptive Position Controller for a d. c. Motor, Proc. of IFAC Intelligent Tuning and Adaptive Control Conference 1991, (to Appear), Jan. 1991.
- [9] Lee, T. H. Lai, W. C. and Kwek K. H. (1989), Generalized Predictive Control Incorporating Feedforward, Proc. of the 1990 American Control Conference, San Diego, U. S. A., May 1990, 2703—2708.
- [10] Hang, C. C., Cai, Y. S. and Lim, K. W., A Dual-rate Approach to Auto-tuning of Pole-placement Controller, Internal Report, National Univ. of Singapore, 1990.
- [11] Hang, C. C., Lim, K. W. and Chang, B. W., A Dual-rate Digital Adaptive Smith Predictor, *Automatica*, 1989, Jan. 1—6.
- [12] Bristol, E. H., Pattern Recognition: an Alternative to Parameter Identification in Adaptive Control, *Automatica*, 13(1977), 197—202.
- [13] Kraus, T. W. and Myron, T. J., Self-tuning PID Controller Uses Pattern Recognition Approach, *Control Engineering*, (1984), June 109—111.
- [14] Lim, K. W. and Hang, C. C., Performance Studies of an Adaptive PID Controller, Proc. Int. Workshop on Applications of Adaptive Systems Theory, Yale Univ., May 1985, 30—35.
- [15] Hang C. C. and Sin, K. K. Auto-tuning of On-line PID Controller Based on Cross Correlation, Proc. 14th Conf. of IEEE Industrial Electronics Society, Singapore, Oct. 1988, 441—446.
- [16] Hang, C. C. and Sin, K. K., A Comparative Performance Studying of PID Auto-tuners, to Appear in IEEE Control Systems Magazine, 1991.
- [17] Lim, K. W. Hang, C. C. and Lee, C. H., Self-tuning Control in the Presence of Periodic Disturbance, IEE Proc. 136(1989), Pt. D, (2), 136, 98—104.
- [18] Hagglund, T. and Astrom, K. J., An Industrial Adaptive PID Controller, Proc. IFAC Symp. on Adaptive Systems in Control and Signal Processing, Glassgow, April 1989, 293—298.
- [19] Nachigal, C. L., Adaptive Controller Simulated Process Results: Foxboro EXACT and ASEA Novatune, Proc. 1986 American Control Conf., 1434—1439.
- [20] Kaya, A. and Titus, S., A Critical Performance Evaluation of Four Single Loop Self-tuning Control Products, Proc. 1987 American Control Conf., 1659—1664.
- [21] Astrom, K. J. Anton, J. J. and Arzen, K. E., Expert Control, *Automatica*, 22(1986), (3), 277—286.
- [22] Astrom, K. J., Hang, C. C. and Persson, P., Towards Intelligent PID Control, Proc. IFAC Workshop on AI in Real-time Control, Shenyang, China, Sept. 1989, 38—43.
- [23] Hang, C. C., Astrom, K. J. and Ho, W. K., Refinements of the Ziegler-Nichols Tuning Formula, IEE Proceedings, Pt. D, 138(1991), (2), 111—118.
- [24] Ho, W. K., Knowledge-based Feedback Control, Ph. D. Thesis, 1991.

A REVIEW OF ADAPTIVE FEEDBACK CONTROL

C. C. HANG and T. H. LEE

(Dept. of Electrical Engineering National University of Singapore)

ABSTRACT

Practical open-loop (gain scheduling) and closed-loop (model reference, self-tuning, pattern recognition) schemes for adaptive feedback control have been developed to overcome problems caused by large variations in process or disturbance in dynamic characteristics. These adaptive feedback control schemes are reviewed from an applications point of view. The need for a comparative performance evaluation through benchmark tests is discussed. Finally, the potential contributions of the emerging technique of expert or knowledge-based control is reviewed.

Key words: Adaptive control; PID controller; knowledge-based control.



C. C. Hang (康长杰) 1970年毕业于新加坡大学电机工程系, 获一等荣誉学位, 1973年获英国 Warwick 大学控制工程理博士学位. 1974—1977年在壳牌东方石油公司(新加坡)和壳牌国际石油公司(The Hague)担任计算机和系统技术工作, 自1977年起在 National University of Singapore 电机工程系工作, 现为教授和系主任, 1983和1987年曾分别在耶鲁大学和 Lund 理工学院做访问科学家, 从1984年起担任国际自控联(IFAC)杂志《Automatica》副编辑.

目前的研究兴趣为计算机过程控制, 自适应控制和专家系统应用.