

## 辨识与控制的配合\*

袁震东

(华东师范大学数学系·上海, 200062)

辨识与控制应该相互配合似乎是一种不言而喻的常识,然而真正认识这一问题的本质及其重要性还只是近几年的事。

众所周知,辨识与控制的自然结合出现于自适应控制中。1980年 Goodwin, Ramadge 和 Caines 正确地证明了自适应控制系统的稳定性和渐近最优性,似乎为自适应控制奠定了理论基础。然而 Goodwin 等人的证明使用了三个假设,其中假设模型复杂性与真系统复杂性一样不符合实际情况,也无法使人接受。于是,引发了八十年代有建模误差的自适应控制研究,即鲁棒自适应控制的研究;引发了九十年代初关于辨识与控制配合问题的研究。为讨论配合问题,1992年 IEEE Transaction on Automatic Control 出了一期特刊,题为 System Identification for Control Design。

本文将讨论辨识与控制的配合问题,并揭示由此引起的一系列研究成果以及我们的看法。

### 1 辨识与控制的相互作用

最早提出控制对辨识有影响的人是 K. J. Åström。他提出了闭环系统的可辨识性问题。一个含未知参数的线性时不变系统,如果用一个比例调节器组成闭环自适应控制系统,可能引起闭环参数不能确定的事实,即闭环不可辨识现象。然而,很快发现:只要不是简单的比例调节,这样的问题几乎不会发生。

然而,辨识与控制的相互作用确实存在,其原因在于在系统辨识中往往采用比实际系统简单得多的模型集。M. Gevers 在 IFAC 第九届(1991)系统辨识学术会议的大会报告中举了两个仿真例子来说明这个问题。Gevers 考虑一个具有稳定极点和非最小相位的真系统(二阶系统),在系统辨识中采用一阶系统作为其模型集,然后把辨识出来的模型系统的极点配置到原点。把模型系统的极点配置到原点与把实际系统的极点配置到原点是两回事。结果把这样的极点配置用于真系统,反而使原来稳定的真系统变得闭环不稳定。究其原因,在于在系统辨识中采用了比真系统简单的模型集。

反过来,他又举例说明:由于采用了简化的模型集及其估计结果来配置极点,可以使原来以低频信号为主的输入信号变为以高频信号为主体的输入信号,从而使系统处于可能产生不稳定的临界状态。

由此可见,辨识对控制有影响,控制对辨识信号也有影响,原因出在简化模型上。

可是,节简(Parsimony)模型是系统辨识中选择模型集的一个原则。由于在系统辨识之前,系统的真实描述并不知道,人们往往选简单的模型集是事实。现在已经清楚,系统辨识中这一原则带来了如此严重的后果。然而,如果把模型集选得很复杂,这将给控制器设计带来困难。因此另谋出路势在必行。

### 2 集员辨识与系统族辨识

集员辨识是用以解决辨识与控制配合问题的一种新尝试。用通常的系统辨识所获得的系统模型在鲁棒控制的设计中只是一个标称系统。鲁棒控制设计光有标称系统是不够的,还须知道实际系统与标称系统的误差有多大。

集员辨识的要点是:假设系统的噪声有界或噪声的功率有界,根据系统输入、输出所提供的信息,确定一个包含着真系统参数或传递函数的成员集。因此集员辨识的结果不是一个单一的系统模型,而是一个系统族或参数集合。这种辨识方法对于鲁棒控制设计是适合的。

集员辨识最早的结果见诸于 1979 年 Fogel 在 IEEE Trans. AC 上的论文。1982 年 Fogel 和 Huang 又作

\* 国家自然科学基金项目。

了进一步改进,发表于 *Automatica* 上.

在参数集员辨识中,假设系统可以用下列回归形式描述:

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta + \omega(t), \quad t = 1, 2, \dots \quad (1)$$

其中  $\theta$  是待估计参数,  $y(t)$  为输出信号,  $\varphi(t)$  是回归向量,它是输入  $u(k)$  和输出  $y(k)$ ,  $k \leq t-1$ , 的线性或非线性函数.  $\omega(t)$  是有界噪声,即假设  $|\omega(t)| \leq \gamma$  (常数) 或  $\omega(t)$  的功率有界,即  $\sum_1^t \omega^2(k) \leq F(t)$ ,  $F(t)$  未知确切形式而满足某种假设. 在后一假定下

$$\begin{aligned} \theta \in \mathcal{O}_k &= \left\{ \theta; \sum_{i=1}^k (y(i) - \theta^T \varphi(i))^2 \leq F(k), \theta \in \mathbb{R}^n \right\} \\ &= \left\{ \theta; (\theta - \theta_c(k))^T P_k^{-1} (\theta - \theta_c(k)) \leq G(k), \theta \in \mathbb{R}^n \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $\mathcal{O}_k$  是参数空间中的一个椭球,  $\theta_c(k)$  是椭球之中心,  $P_k$  和  $G(k)$  都可以由一组递推关系式给出.

目前关于多变量系统参数的集员辨识,传递函数的集员辨识(辨识结果是复平面内一个区域),传递函数估计误差的硬界等均已获得. 这些结果将见诸于已经发表或将要发表的论文中,论文的作者有 Wahlberg, Liung, 袁震东, 徐桥南等.

由集员辨识得到的启发,我们认为考虑系统族的辨识问题是有意义的. 系统族辨识问题的提法可归结如下:

设  $\mathcal{M}$  为某一模型集,  $\mathcal{S}$  是未知的系统族,  $\mathcal{S} \subset \mathcal{M}$ . 已知  $\{u(t), y(t), t=1, 2, \dots, N\}$  是  $\mathcal{S}$  中某一系统的输入、输出数据集. 问能否对  $\mathcal{S}$  作出合理的估计,使得这种估计具有人们期望的某些优良性质.

注 1  $\mathcal{M}$  为某一模型集,如  $n_0$  阶的线性系统全体,某种非线性系统. 总之是具有某种特征的模型的集合.

注 2  $\mathcal{S}$  是一个系统族,这个系统族表示设计者所关心的系统,实际上代表所有可能出现因摄动而偏离标称系统的一切系统.

这一问题的研究尚未见诸于文献.

### 3 未建模动态的估计

设真系统可以由下式描述

$$y(t) = G^o(q)u(t) + v(t), \quad t = 1, 2, \dots \quad (3)$$

其中  $u(t)$ ,  $y(t)$ ,  $v(t)$  分别为系统的输入、输出和干扰. 假定某些先验知识已给出. 设稳定传递函数  $G^o(q)$  可以分解为一个起主导作用的低阶参数部分  $G(q, \theta^o)$ , 简称主部, 和一个未建模部分  $\Delta G^o$ , 简称为余部, 这样

$$G^o(q) = G(q, \theta^o) + \Delta G^o(q). \quad (4)$$

为了便于使用线性回归方法,假定主部关于参数  $\theta$  是线性的,即

$$G(q, \theta) = \sum_{k=1}^m b_k B_k(q), \quad \theta = (b_1, \dots, b_m)^T. \quad (5)$$

其中  $B_k(q)$  是后移算子  $q^{-1}$  的  $k$  次幂或者是 Laguerre 或 Kautz 滤波器. Wahlberg 已经证明用后两种表示,阶次  $m$  取得更小.

为了计算误差的硬界(hard bound),我们把未建模部分分成二项

$$\Delta G^o(q) = \sum_{k=1}^n \delta_k q^{-k} + \sum_{k=n+1}^{\infty} \delta_k q^{-k}, \quad (6)$$

这样, (3) 式可以写成回归形式

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta^o + e(t). \quad (7)$$

这里

$$e(t) = v(t) + \sum_{k=n+1}^{\infty} \delta_k q^{-k} u_+(t),$$

$$u_+(t) = \begin{cases} 0, & t < 1, \\ u(t), & t \geq 1. \end{cases}$$

在下列假定下:

$$S1: \max_t |u(t)| \leq c, \quad (\text{常数})$$

$$S2: |v(t)| \leq \gamma_1, \quad (\text{常数})$$

$$S3: \sum_{k=x+1}^{\infty} |\delta_k| \leq \epsilon_n. \quad \text{尾部效应充分小}$$

那么利用 1987 年 Dasgupta 和 Huagn (IEEE. Trans. on Information Theory) 的算法可获得  $\Theta$  参数的集员估计以及传递函数估计误差的硬界.

$$\begin{bmatrix} \text{Re}(G^\circ(e^{i\omega}) - \hat{G}(e^{i\omega})) \\ \text{Im}(G^\circ(e^{i\omega}) - \hat{G}(e^{i\omega})) \end{bmatrix}^T N^{-1}(e^{i\omega}) \begin{bmatrix} \text{Re}(G^\circ(e^{i\omega}) - \hat{G}(e^{i\omega})) \\ \text{Im}(G^\circ(e^{i\omega}) - \hat{G}(e^{i\omega})) \end{bmatrix} \leq 1. \quad (8)$$

其中  $\hat{G}(e^{i\omega})$  是由参数估计给出的传递函数估计,  $N^{-1}(e^{i\omega})$  是与  $\sigma(N), P(N)$  等有关非负定阵. (8) 式给出了传递函数估计误差的硬界, 从中可导出未建模部分的估计.

#### 4 随机嵌入法

Goodwin 认为集员辨识或通常的辨识均需要先验信息(噪声有界或噪声为随机过程), 而这种先验知识是很难证实的. 因此他提出了随机嵌入法.

Goodwin 假定: 系统的真传递函数  $G_T(e^{i\omega})$  是以  $\omega$  为下标变量的随机过程(一般随机过程的下标变量是时间  $t$ ). 假设模型在  $M_p$  中某一值  $\theta_0$  有下式成立

$$G_T(e^{i\omega}) = G(e^{i\omega}, \theta_0) + G_d(e^{i\omega}). \quad (9)$$

假定  $G_d(e^{i\omega})$  是零均值的随机过程, 即

$$EG_d(e^{i\omega}) = 0, \quad (10)$$

$E(\cdot)$  表示对所有未建模的实现作平均. 设

$$G_d(e^{i\omega}) = \Pi(e^{i\omega})\eta. \quad (11)$$

其中

$$\Pi(e^{i\omega}) \triangleq (e^{-i\omega}, \dots, e^{-iL\omega}),$$

$$\eta^T \triangleq (\eta_1, \dots, \eta_L).$$

系统的输出可表示为

$$y_k = \phi_k^T \theta_0 + \phi_k^T \eta + V_k. \quad (12)$$

这里  $V_k$  是通常辨识中的随机噪声.

$\eta$  的估计可导出未建模动态的估计.

#### 5 与集员辨识配套的控制设计

与集员辨识配套的控制设计, 其研究刚刚开始. 目前只获得了 FIR(有限脉冲响应)系统的设计, 且计算比较复杂.

这里的问题是: 已知系统的参数属于一个给定的椭球(例如, 由集员辨识获得的结果), 找出一个极小化最大二次型目标泛函的与有限个输入输出有关的控制器. 这种控制器称为 Minimax 控制, 这本质上是一个博弈问题. 具体叙述如下:

设系统可以用 FIR 模型描述

$$y(k) = \sum_{j=1}^n b_j u(k-j) = \Phi^T(k)\theta. \quad (13)$$

已知

$$\theta \in \Theta = \{\theta: (\theta - \theta_c)^T \Gamma (\theta - \theta_c) \leq 1\}. \quad (14)$$

其中  $\Gamma = \Gamma^T > 0$  是已知矩阵,  $\Theta$  表示以  $\theta_c$  为中心的椭球,  $\Gamma$  给出了椭球的大小和方位.

二次型性能指标为

$$J_0 = \rho u^T u + y^T y.$$

其中  $\rho$  表示权系数, Minimax 控制为

$$u^* = \arg \min_{u \in U} \max_{v \in V} J_0.$$

M. K. Lau 和 Kosut 等人研究了  $\max_{v \in V} J_0$  的性质, 并给出了  $u^*$  的计算方法和仿真例子.

## 6 结束语

辨识与控制是有相互作用的, 与控制匹配的辨识方法以及与辨识匹配的控制设计均值得研究. 目前集员辨识及其配套的控制设计理论已经发展起来, 但仍有许多问题需要研究.

$H_\infty$  控制研究如何抑制外界干扰对输出的影响, 其相应的  $H_\infty$  辨识也已展开.

然而, 辨识与控制的配合问题还没有最终解决. 我们认为这一问题的研究为系统辨识与控制器设计都开辟了新的广阔的研究领域.

# 关于预测控制的进一步思考

席裕庚

(上海交通大学自动化研究所, 200030)

七十年代中期出现的预测控制算法, 在经历了近二十年的发展后, 已以其强大的生命力而为控制界所瞩目. 面对预测控制的蓬勃发展, 如果我们重温一下 Richalet 等 1978 年在 *Automatica* 上发表的“模型预测启发控制: 工业应用”这一经典文献, 并认真地思考一下: 预测控制的新概念在何处? 为什么它会获得工业界的青睐? 它的本质是什么? 这对我们继续从事预测控制的研究和应用是不无启发的. 本文就此对预测控制在技术层次和方法层次上作了进一步的思考, 剖析了预测控制从传统模型预测发展为一般信息处理的意义, 指出了其实用技术的关键是解决有约束多目标多自由度的优化问题, 并对预测控制所体现的人类在复杂环境下控制决策的“智能”与智能控制关系提出了看法.

## 1 基于信息处理的功能模型

预测控制通常被称为基于模型的控制或模型预测控制, 这揭示了其基于模型进行预测的特征. 但是随着模型概念的拓广, 所谓的模型已不能狭义地理解为过程的数学模型. 事实上, 从预测控制最早出现的算法形式, 如 DMC, MAC 来看, 就不是过程的状态方程或传递函数, 而是其阶跃响应、脉冲响应这类非参数模型. 因此, 模型预测并不要求限定模型的形式, 关键只在于模型的预测功能. 在这个意义上, 预测控制所利用的模型实际上只是服务于预测的信息处理方式, 它比传统控制中的模型具有更广泛的意义.

预测模型通常是根据过程的先验信息离线获得的, 在传统控制理论中信息的处理归结为对过程结构与参数的辨识. 虽然其理论与方法已见成熟, 但耗费代价甚大. 人们自然不愿束缚在这一固定思路上, 而希望更直接从先验信息出发, 寻找合适的模型. 阶跃响应、脉冲响应作为预测模型, 正是出于这样的考虑. 这种以功能取代结构的建模思想更符合模型的本意, 也具有更大的潜力. 正是基于功能上的要求, 当人工神经网络的研究刚进入控制, 就出现了基于人工神经网络的预测控制. 这种非传统模型概念允许我们采用各种有效的信息处理手段去建模和预测, 也提供了模式识别、模糊技术等人工智能方法进入预测控制的可能性.

同样由于只强调预测模型的功能要求, 模型的单一性已不再成为建模的束缚. 在必要时, 可以采用分段建模的多模型方法. 只要利用它们能准确地进行预测, 并且在技术实现时不过于复杂, 这类模型同样能用于预测控制, 丝毫不因其理论分析的困难而排斥其在技术上的实用性. 这是一种用多个简单模型取代一个复杂模型的信息处理方式, 对于从过程信息中难以统一出单一模型的某些复杂动态系统, 这种多模型预测有其明显的优点.

由于先验信息的局限性和过程的时变性, 离线建立的预测模型在用于在线预测时, 未必是准确的, 必

须根据实时信息不断地进行校正. 传统的在线辨识就是不断校正模型的手段. 但从信息处理的角度来看, 也可以用多重预测的方法解决这一问题, 即把基于先验信息离线建立的预测模型作为基础模型用以预测过程的主要动态, 而把实测信息与预测信息间的误差作为描述不确定性的信息, 在高层对此进行预测, 并以此补充过程的动态描述. 这种信息的分层处理技术不但可适应对象、环境的变化, 而且淡化了对基础模型精确度的要求. 它在早期的 DMC, MAC 算法中已有所表现, 即所谓模型预测与误差预测的结合. 但这里的误差预测往往采取了简单的启发式方法. 如果我们认识到这种误差信息蕴含了基础模型中未曾包含的一切不确定或被忽略的因素, 那么所谓误差预测的概念可以发展成更一般的不确定性建模与预测概念. 它可归结为基于一系列过去的误差信息采用因果或非因果的方式预报未来的误差. 神经网络、时间序列分析等方法在这一层次的建模与预测中将是大有所为的.

预测控制对模型概念的拓广, 为各种非传统的模型、预测概念和各种实用智能技术在预测控制中的应用开辟了新天地, 也促成了其向智能化的发展. 我们提出的多层智能预测控制, 在纵向表现为信息分层的多重建模和预测, 在横向表现为各种不同模式的预测、优化, 体现了按不确定性程度分层的智能决策, 这正是预测控制摆脱了传统模型的结构约束, 向具有一般意义的信息处理方向的发展.

## 2 适合于工业应用的有约束多目标多自由度优化

预测控制的核心是在线的滚动优化. 在众多的理论研究文献中, 这一在线优化问题都被简化成无约束的二次性能指标优化, 这与其实际应用状况相去甚远, 也正反映了预测控制的应用超前于理论研究的现实. 因而, 我们切不能以理论研究的简化来想象其应用. 在工业过程中, 预测控制的成功应用大多是在多变量有约束的情况下, 各种应用软件包也常冠以“多变量优化控制”之名. 从去年引进我国的 ID-COM 软件包来看, 它的在线优化至少包含了以下部分:

- 约束: 控制量的界域/设定值约束,  
被控量的界域/设定值约束,  
中间量约束;
- 目标: 优化性能指标,  
辅助性能指标;
- 自由度: 控制量与被控量数目不一定相等.

因此, 预测控制的在线优化不是一个平凡的优化问题, 而是一个有约束多目标多自由度的优化问题 (CMMO, Constrained Multi-Objective Multi-degree of Freedom Optimization). 例如, 它可以要求两个控制量控制三个被控量, 其中两个控制在一定界域内, 另一个控制到设定值; 又如, 可以在满足某一性能指标的同时, 要求被控量在一定范围内, 并且控制量不允许超过某一值, 等等. 这类问题的形式各不相同, 取决于实际的需要与可能, 但具有相当一般的意义.

从理论上讲, 这类优化问题尚有不少有待解决的问题. 但在实用中, 过程操作者可以针对约束“软”、“硬”程度和性能指标的不同要求, 通过人机对话调整相应的条件, 实现在过程条件下最满意的控制. 这种柔性的优化和方便的人机界面, 正是预测控制软件包受到过程操作者欢迎的原因, 也是预测控制应用的实际状况.

从技术角度看, 如何把 CMMO 问题规范化并通过有效的方法快速求解, 是预测控制优化软件质量的关键. 这里的实质问题是以控制变量为自由变量、以“软”、“硬”约束和性能指标为广义目标的多目标优化问题. 研究这一优化问题的快速算法, 并形成良好的仿真环境和人机界面, 将是这类软件包的关键技术. 只有解决了这些问题, 才能满足工业环境下有约束、多目标、出现故障仍能运行等要求, 并便于人机交互和培训操作者.

## 3 在复杂环境下控制决策的智能模式

Richalet 等在“模型预测启发控制: 工业应用”一文中的最后一段, 探讨了预测控制的方法论, 指出其基本思想类似于人类依据外部环境的内部模型来决定如何操作, 并指出有效的建模和快速的计算机是

这类“方案 (Scenario) 技术”得以实现的技术保证。也就是说, 预测控制就象人一样, 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, 并从中择优予以实施, 这一思想无疑是十分深刻的。

回顾预测控制在复杂工业过程中的成功应用, 其方法原理正体现了这种智能思维模式。目前, 预测控制的算法已不下几十种, 但它们都是建立在模型预测、滚动优化、反馈校正这三条原理的基础上。把它与传统的最优控制比较便可知, 预测控制是对最优控制应用于不确定环境时的修正。预测控制保持了基于优化的控制原理, 但把优化局限于有限时段。特别重要的是, 它通过在线反复优化和反馈校正使开环优化在全过程中闭环化, 用以及时校正不确定性的影响, 因而对复杂环境的适应性远远胜过传统的最优控制。如果把这些原理作为一种思维模式, 则它在人类生活中已屡见不鲜。例如, 作为现代化管理方法之一的滚动计划, 正产生于这种思维。即使是人们穿越马路这样一件小事, 也有非常类似的思维。人从不要求掌握来往车辆的全部信息, 而只需顾及近几十米的车流情况, 但边走还需边看, 一旦估计不准或有新的情况出现, 就调整自己的步伐。这正是在线通过反馈根据有限信息反复决策的过程。这些例子都表明了预测控制的方法原理是人类在有不确定性的复杂情况下进行决策的一种智能思维模式。把与具体的控制问题联系起来, 把不同的具体内容嵌入这三条基本原理, 就形成了形形色色的预测控制算法。所以, 预测控制的方法原理一方面是控制论中模型、优化、反馈等概念的具体化, 另一方面又是各种预测控制算法的共同点。自然有理由认为, 把预测控制提到方法的高度来认识, 它应是一类特定的智能决策模式。

智能控制是模拟人类智能行为的科学, 它不但应包含学习、推理等功能研究, 而且还应包含人类在处理复杂问题时具有较高智能程度的决策思维方法。作为新一代的控制理论, 智能控制不应仅仅是更换工具后对原有控制理论的并行发展, 而应在更高的层次上, 研究原有理论无法研究的内容。在这个意义上, 是否可以认为结构、方法这类更具一般性、指导性的内容也是智能控制的一部分呢? 如果我们注意到自适应控制的基本思想和结构引发了众多的自适应控制算法, 如果我们承认 Saridis 提出的分层递阶智能结构属于智能控制的内容, 那么自然也有理由把预测控制的方法原理作为智能控制的组成部分。它们在对待复杂性方面都有自己的特色, 都在某种程度上体现了人类的智能思维。而一旦把具体的工具结合进去, 就可衍生出形形色色的控制算法, 并与传统的控制语言融为一体。

把预测控制与智能控制联系起来, 不是为了赶时髦, 也不是说某个预测控制算法就是智能控制。问题的意义在于, 预测控制的产生和机理确实令人信服地表明, 它在处理具有不确定性的复杂控制问题时, 确实是一种“聪明”的做法, 称其具有某种程度的智能, 并非言过其实。它一方面为我们从特定的角度理解智能控制提供了启迪; 另一方面, 也有助于加深对形形色色预测控制算法本质的理解。

#### 4 结束语

在本文的最后, 我们想引用 Brisk 在第 12 届 IFAC 世界大会的大会报告“过程控制: 理论与效益”中所反映的工业界对预测控制的观点作为全文的结束语。

- 预测控制的最主要特征是在线优化。
- 预测控制的发展主要归功于实践者, 而非控制理论。
- 预测控制的成功在于满足了许多实际的需要: 约束; 易于获得的经验模型; 可测扰动的考虑; 实施标准化; 对操作者透明。
- 预测控制是理论与实践间“Gap”的非常规例子, 即一般情况下理论超前于实践, 而预测控制正相反。
- 预测控制不是过程控制的万应灵药, 它计算耗时, 建模未利用过程知识, 黑箱模型缺乏对过程的理解而不能支持新系统设计, 在许多应用场合是大材小用。

注意到工业界的这些观点, 将对我们进一步研究和应用预测控制提供有益的启示。

# 复杂大系统的集成控制

李人厚

(西安交通大学系统工程所, 710049)

## 1 引言

随着科学技术的发展,生产系统的规模越来越大,形成了复杂的大系统,象电力系统,化工系统,军事指挥系统,柔性制造系统等等都是典型的复杂大系统.所谓复杂性主要是指受控对象模型的不确定性;高度非线性;分布式的传感器和执行器;系统的动态突变;多时间标度;复杂的信息模式;庞大的数据量以及严格性能指标.上述这些系统的规模也往往很大,在地理上可复盖几十公里至几百公里.对于这类复杂大系统,如果操作不当,会造成巨大的经济损失,甚至发生灾难性的后果.

复杂大系统的控制或自动化目标,应使系统具有强大的容错能力;能适应不断变化的环境;能正确处理各种信息,减少不确定性;并以安全和可靠方式进行规划,产生和执行合理的控制规律,使整个系统从总体上达到最优或次优目标.

显然,对复杂大系统采用常规或传统的控制理论和方法是无法实现控制目标的.必须建立新的自动化概念、理论和方法,要把其它学科的知识引入到控制领域,形成集成的智能控制理论和技术.这里所指的集成,一方面是指各种理论和技术的集成,例如把控制、辨识、估计理论和通信理论、计算机科学、人工智能、运筹学等结合起来;另一方面是指系统的结构采取“分而治之”的模块化方法,利用计算机网络或其它总线技术将各种功能集成起来,形成自下而上递阶式的整体结构,对系统各部门进行合作、协调的控制和管理.因此,复杂大系统的集成控制应该包括三个层次:

- 1) 最低层的多传感器的信息集成
- 2) 中间层监控系统的集成
- 3) 高层的总体集成(企业集成)

下面分别介绍集成控制的一些概念和方法.

## 2 多传感器信息集成

在复杂的大系统中,为了获取有用信息,往往采用数量众多的传感器.这些传感器所得到的信息难免受到各种噪声的污染,传感器本身也难免失误,为了控制的可靠,在使用这些信息之前,必须将它们进行集成和融合.

所谓多传感器信息集成是指协同使用传感器所提供的信息,而融合则是指信息合成过程中的任何阶段,它把各种信息来源的信息组合(融合)成统一的格式.图1表示了多传感器信息集成的一般模式.图中有 $n$ 个传感器信号,经过各节点的融合,可向系统提供统一的信息.

信号在融合过程中要受到系统来的控制信号的干预,这在下面一节控制系统集成中还要提到.其中“传感器选择”用于选择最合适的融合值以适应环境或系统内部条件的变化.“环境(外界)模型”可以对传感器信号进行预测,以便更正确地寻求模式匹配.一般,传感器信息集成过程中,由低到高其抽象程度不断提高,最低级以原始的信号表示,经过几个阶段的融合,就变成统一的数字或符号表示的信息.

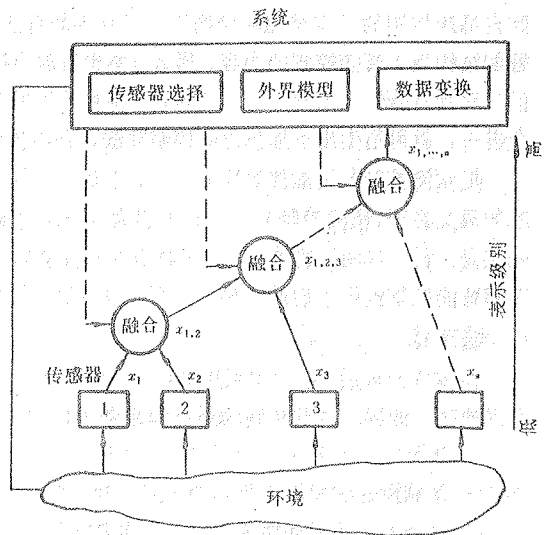


图1 多传感器集成和融合一般模式

在复杂大系统中之所以要进行信息的集成, 主要是因为它向系统提供了信息的冗余性、互补性、及时性以及廉价性。

**冗余性.** 每一传感器以不同的精度感知环境中相同的特征, 从一群传感器中所取的信息就存在冗余, 冗余信息的融合就减少了信息的不确定性, 提高了对对象特征感知的准确度. 在传感器发生失误的情况下, 多传感器所提供的冗余信息可提高系统的可靠性.

**互补性.** 多传感器可以获取仅用单个感知器所不能获得的环境特征. 一般单个传感器只能获得对象特征空间的一个子集. 而多传感器的信息合成可以获得完整的特征信息集合.

**及时性.** 多传感器的信息合成所得到的等效信息, 要比单传感器更及时, 因为信息的集成可以并行处理.

**廉价性.** 与单个传感器获得等效的信息相比, 多传感器获取信息的价格要便宜些.

目前比较通用的多传感器信息融合的方法有以下八种:

1) 加权平均法. 这是最简单和直观的信息融合方法, 它把一组传感器所提供的冗余信息加权平均.

2) 卡尔曼滤波. 它利用测量模型的统计特征, 用回归方法决定融合数据的估计值, 在统计意义上, 这个估计是最优的. 当被测模型为线性, 误差可按白色高斯噪声建模时, 卡尔曼滤波可为融合数据提供唯一的最优估计.

3) 合意传感器的贝叶斯估计. 其基本思想是抛弃有失误的传感器的信息, 从“合意”的传感器中计算信息的融合值.

4) 多贝叶斯估计. 把单个传感器当作一个贝叶斯估计器, 利用多贝叶斯方法, 将与相应对象有关的概率分布组合成一个联合后验分布函数, 然后将此联合分布的似然函数极大化, 算出传感器的集成信息.

5) 统计决策方法. 这是二步法信息融合技术, 首先将来自传感器的数据进行鲁棒假设验证, 然后用一类鲁棒极大极小的决策规则将验证通过后的数据进行融合, 求出融合值.

6) 证明推理方法. 这是贝叶斯估计的扩展. 在贝叶斯方法中, 对所有没有或缺乏信息的命题都赋给相等的先验概率, 而证明推理对未知的命题不赋予先验概率, 等有了肯定的支持信息再逐步减少这种不知性.

7) 模糊逻辑. 用隶属函数来表明命题的真实程度, 模糊逻辑可以用于对象辨识和景象分析中的信息融合.

8) 具有可信度的产生式规则. 产生式规则用符号表示特征和相应传感器信息之间的关系, 可信度与每一规则有关, 它说明不确定的程度. 在推理中, 对同一对象所用的二条或更多的规则组合成一条规则时, 就形成信息的融合.

从安全、可靠和准确运行出发, 复杂的大系统必须采用多传感器信息集成技术, 这也是复杂大系统与一般系统控制的重大区别之一.

### 3 监控系统的集成

大规模复杂系统的控制必须建立在常规控制与仿人智能控制相结合的基础上, 其控制系统结构有多种多样, 但就本质来说, 这种集成的控制系统基本上由三个重要单元组成, 即: 1) 环境(或外界)模型单元; 2) 评判单元; 3) 控制规律生成单元. 图 2 表示了集成控制系统的结构以及各单元之间的关系. 现将各单元的功能简述于下.

1) 环境模型. 环境模型是集成控制系统对环境(或对象)状态的最佳估计. 模型单元包含有关环境或对象的知识库、存贮与检索信息的数据库及其管理系统. 环境模型单元具有仿真功能, 能产生期望值与预测值. 它可对环境状态的现在、过去和将来提供各种信息. 模型的建立采用定量和定性相结合的方法, 按工程语言来描述. 这样可以减少建模中的不确定性.



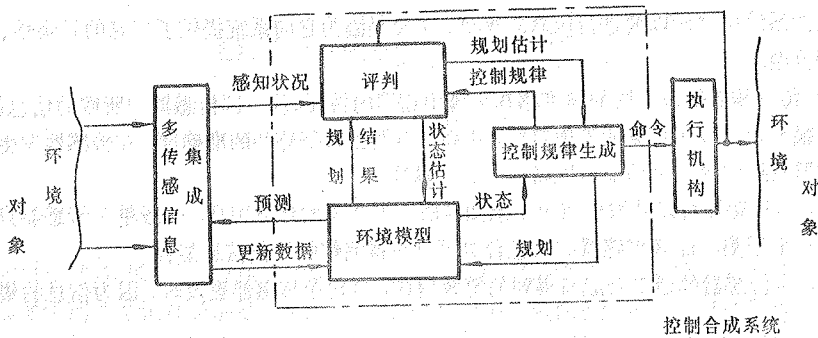


图2 集成控制系统的结构框图

环境模型所提供的状态信息可以为控制规律生成单元服务，后者可按状态信息作出智能规则、智能控制规律或命令。模型单元的预测可送到多传感器的信息合成系统，实现信息合成过程中的校正、模式匹配、基于模型的状态、对象与事件的辨识。环境模型也向评判单元提供各种评判所需的数据、知识和规划的结果，以便对控制系统运行过程中的价值、风险、利润、不确定性、命令的有效性等等进行评估和确认。环境模型的知识库和数据可由多传感器的集成信息予以更新。

**评判单元。**复杂大系统控制中，为了保证它的安全可靠，必须对控制信号、命令进行确认 (Validation) 对系统行为进行预测和评估以决定各种采取的控制作用是否正确。

信号确认是指对传感器集成信息进行监督，并用适当方法加以抉择，抛弃那些有误的信号，发送有效的信号。

命令的确认是指决定控制系统或操作员所产生命令的正确性，验证执行器最终输出的正确性。命令确认是复杂大系统控制的一个新概念。命令确认的步骤有三。1° 辨别错误信号；2° 鉴别和隔离失误的部件；3° 将偏离正常值的控制命令（信号）量化。命令的确认使得控制策略有效性大大提高，我们要求控制单元和执行器的输出必须限定在所希望的轨迹界限内。

评判单元还应确定系统各种部件的好与坏，重要与否，以及奖惩因素，它还估计环境的状态和假设规则的预期结果，评估控制行为的价值、利润与风险；计算校正的概率；并对状态变量赋与可信度和不确定性的参数。评判单元是为复杂大系统的最优决策和控制提供基础。

3) 控制规律生成单元。控制规律生成单元产生控制命令，选择目标，产生规划和执行任务。

在这个单元里包含了各种连续和离散的控制算法，这些算法应有足够的鲁棒性以适应可能产生的环境和系统的变化。控制规律的产生必须是常规控制算法和仿人智能控制算法的合成。因此，它包含有由神经网络、模糊控制逻辑、专家控制方法和逆动力学等综合的集成控制系统。这也是复杂大系统自动化的一个新的概念。由于神经网络，模糊控制逻辑，专家控制系统以及常规的控制方法都有各自的优点和不足之处，譬如神经网络有很强的学习和自适应能力，在训练中可自动获得知识并具有并行处理的特征，但网络的映射是透明的，训练时间长，结论解释困难，出现异常情况难以应付。基于模糊逻辑和专家系统的控制可以处理复杂和异常情况，易于推理和解释，但没有学习功能。传统的控制方法精确，易于编程，特别适合于平衡点附近的控制，但它的方法基于精确的模型，当模型不精确时难以取得预期的效果。因此，在复杂大系统的控制中必须综合各种方法的特长，按不同情况和对象进行集成，才能有更好的效果。

#### 4 总系统（企业）的集成

一个复杂的大系统，可能是整个企业的一部分或全部分。决定一个大规模企业生产率的因素，除了信息限制之外，还受到其它因素，如劳动力，资金等等的限制。为了使产品进入竞争激烈的市场，使系统（企业）能最大限度地获得效益，除了采用低、中层的信息集成和控制集成之外，还必须使分布在不同地区，不同部门的各类人员（包括高级的管理人员，工程师，技术员，产品销售人员）的各种决策纳

入共同合作的框架,使系统中的人和计算机能够在统一的目标下,有效地相互支持和合作。这就是总系统集成或企业集成所要达到的目标。

企业集成必须满足以下四个基本要求

1) 信息存取。集成系统应易于存取信息资源,并通过合作网络提供全面的服务。为了便于存取信息,必须对各种来源的信息进行合成以建立统一的格式。

2) 监督和自动化。除了方便地存取信息之外,要使系统中所有的人和计算机软件随时跟踪信息,对任何影响人和软件的决策的事件和更新后的信息要及时通知,以便使他们随时采取合适的反应。

3) 合作和协调。系统中所有的人和计算机要在时间(例如产品生命周期的各个阶段)和空间(譬如,在不同部门的设计和和生产工程师共同解决一个问题)范围内有效地象一个整体协同工作。系统内成员需共享信息和知识,并随时警惕潜在的决策上冲突。

4) 系统集成。独立开发的各种软件必须易于集成为一个统一框架。这样软件能易于应用和维护,并可无间隙地合作。这个框架还应提供一个渐进的途径,能够使企业从单纯的以人为基础的操作过渡到人和计算机之间合作地工作。

为了实现上述的需要,已提出了各种不同的企业集成的方案。从本质上来分析,总系统集成就是分布式智能系统(DIA)或分布式专家系统的协调和组织,其中一种可行的方案如图3所示,它是一个以多功能知识库(MKB)为核心的集成系统。

图中 MKB 是一个综合性的面向对象的企业模型。MKB 模型包括人员、装置、设备、仓库、生产过程以及

其它资源的描述,它具有企业的信息流,物流和决策流, MKB 还与企业的信息基础结构(CIM, 数据库, 财会系统等)相连,所以它持续地反映了企业的实际情况,各智能单元(IA)用智能通信网连接,并可以通过 MKB 用高级服务协议交换信息资源, MKB 也可能看成是信息的交换中心。

IA 单元实际上是人的活动模型,它反映人在各种技术和服部分决策和执行过程,也可以是专家系统或工作站,所以企业的合成就是智能单元的集合,属于人工智能一个十分活跃的分支,详细介绍超出本文的范畴。

目前除了利用知识工程中的一些结果之外,还提不出系统的方法来研究 DIA 系统和企业集成的问题。在这个领域中主要关心的问题有: IA 之间统一的协商协议;在数据和知识的传送过程中分布问题的求解和协调方法;组织、规划、调度的通用表示方法和算法;一般性冲突的求解;各种分布式求解问题中关于分布式约束的满足条件以及 DIA 在组织计算中的作用等等。

企业的集成和 DIA 的研究还有不少技术和理论问题需要解决,现有的原型系统要推向实际应用还有一段较长的路程。

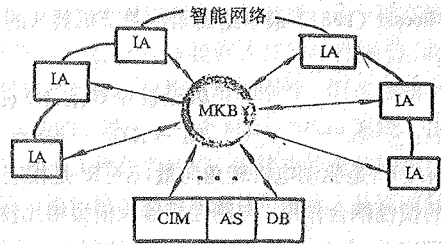


图 3 基于 MKB 的集成系统的结构

## 参 考 文 献

- [1] Luo, Ren C.. Multisensor Integration and Fusion in Intelligent Systems. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 1989, 19(5):901-931
- [2] Antsaklis, P. J. et al. An Introduction to Autonomous Control Systems. IEEE Control Systems, 1991, 11(4):5-13
- [3] Berkan, B. C. et al. Advanced Automation Concepts for Large-Scale Systems. IEEE Control System, 1991, 10:4-12
- [4] Durfee, E. H.. The Distributed Artificial Intelligence Melting Pot. IEEE Trans. on Systems Man and Cybernetics 1991, 21(6):1301-1306
- [5] Pan, J. Y. C. and Tenenbaum, J. M.. An Intelligent Agent Framework for Enterprise Integration. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, 1991, 21(6):1391-1408
- [6] 戴汝为. 智能控制系统. 模式识别与人工智能, 1990, 3(3):1-7

# 柔性机器人的控制

周其节 徐建闽

(华南理工大学自动控制系·广州, 510641)

一些应用领域要求机器人耗能低、快速和重量小,因而机构要设计得轻巧.如果对机器人运动的性能要求较高,则在设计控制器时必须考虑机械在运动中的弹性变形.近年来柔性机器人的控制问题已引起广大研究人员的注意.机器人的柔性包括关节的柔性和连杆的柔性.关节柔性是指传动机构和关节转轴的扭曲变形,通常用集中参数模型描述.连杆柔性是分布型的.为了简化问题,根据实际情况,一般文献只单独讨论其中一种柔性的影响.只有少数文献同时考虑两种柔性都存在的情况.

## 1 柔性关节机器人

Nicosia (1981) 最早给出柔性关节机器人的动态模型.目前人们普遍接受 Spong (1987) 给出的动态模型:

$$\begin{aligned} D(q_1)\ddot{q}_1 + C(q_1, \dot{q}_1)\dot{q}_1 + g(q_1) + K(q_1 - q_2) &= 0, \\ J\ddot{q}_2 - K(q_1 - q_2) &= u. \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $q_2 \in \mathbb{R}^r$  是驱动电机转角向量,  $q_1 \in \mathbb{R}^r$  是相应的关节转角向量.此模型忽略了弹性变形的阻尼力和  $q_1, q_2$  间的惯性耦合作用.与刚性机器人模型相比较,有两点差别使柔性机器人的控制变得更为复杂: 1) 柔性模型有  $2n$  个自由度,但只有  $n$  个控制力.这使一类基于逆动态的控制方法不能直接应用. 2)  $u \rightarrow \dot{q}$  的映射不是无源的.刚性机器人的自适应控制理论中经常利用这种无源性来讨论系统的稳定性和收敛性.

可以证明,对于模型 (1),可用微分同胚变换和状态非线性反馈实现全局线性化,这需要准确知道模型的参数,通常这是难以做到的.但线性化后,模型匹配条件能满足,即参数干扰处在输入的值域中,因而可用鲁棒控制方法克服参数不准确带来的影响.用于 (1) 模型的鲁棒控制设计方法包括李亚普诺夫方法、滑动模设计和高增益设计等.实现全局线性化的另一问题是需要全部状态的信息,在一般情况下难以提供这些信息,或者耗费太大. Bortoff 等 (1989) 用高增益法设计状态观测器,以获取状态的估值.非线性系统中分离性原理不成立.用状态观测值代替真值,对反馈系统的稳定性将产生什么影响,这个问题有待研究.

文献中提出各种自适应控制方法,用于柔性关节机器人.例如, Ahmad 等 (1990) 给出的方法只需要关节的角位移和角速度信号,用李亚普诺夫方法证明了系统是全局稳定的,该自适应算法比较简单.

当关节的柔性不严重时,可用奇异摄动方法把模型 (1) 分解为慢时间子系统 and 快时间子系统.控制力矩则由两部分组成.对快子系统可用速度反馈镇定,对慢子系统可用积分流形法、自适应控制等.

## 2 柔性连杆机器人

通常把机器人的柔性连杆当作 Euler-Bernoulli 梁,而忽略连杆的剪切变形、轴向变形和扭曲变形.梁的自由振动方程为

$$\frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} + \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = 0, \quad 0 < x < L, \quad (2)$$

除初始条件外,还要给定边界条件,它对连杆模型分析和控制器的设计有重大影响.

采用离散化方法可把 (2) 式转化成常微分方程.设 (2) 式的解可表示为

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i(t) \phi_i(x), \quad (3)$$

则可把 (2) 式分解为无穷多个常微分方程.一般只取 (3) 式中有限的  $m$  项之和,  $\phi_i(x)$  叫振型函数,  $a_i(t)$  是相应的变形坐标.可以证明,如果驱动力矩不激发那些被忽略的高频振型,则不会导致系统的

不稳定。振型函数的选择方法有：1) 按 (2) 式分析解的模态函数，但只对简单几何形状的梁才容易求解。2) 有限元法，可适用于不规则形状的连杆。

用 (3) 式表示梁的变形，以  $q_i(t)$  为弹性变形的坐标，便可写出连杆的动能和势能，然后用拉格朗日方程求出其动态模型。Book (1984) 给出详细的推导过程，得到柔性连杆机器人的动态模型

$$M(x)\ddot{x} + D(x, \dot{x})\dot{x} + Kx + F(x, \dot{x}) + G(x) = B(x)T. \quad (4)$$

其中  $x^T = [q_r^T, q_f^T]$ ， $q_r \in \mathbb{R}^n$  是刚性关节变量， $q_f \in \mathbb{R}^m$  是柔性模态变量， $T$  是控制力矩。由于梁的变形有分布性质，这些矩阵元素都要用积分计算，过程比较繁琐，现已有一些较成熟的软件做这些计算。

关于有移动关节的柔性机器人的模型与控制，目前研究得非常少。Müller (1990) 指出其模型是时变的非线性微分方程，并且阶数也是时变的，其控制问题有待研究。

(4) 式中忽略了振动的阻尼项，通常它是很小的。在轨迹跟踪时，要设法引入阻尼，以抑制被激发的振动。可从几方面采取措施：

1) 柔性臂的设计。使用复合材料，它比纯金属有更大的阻尼，但成本较高，而且难加工。在连杆表面涂上粘弹性层是很有效的方法，可提高阻尼 10 倍。但这种粘弹性材料对温度变化较敏感。另一种方法是贴一些压电陶瓷片，它既可作为检测元件，也可作为执行元件，构成闭环，以控制连杆的弹性振动。此方法的缺点是增加了控制线路的复杂性。在机械设计方面，采用平行连杆机构可增加刚性，但这会减小其工作区域。另一种方法是增加机器人的自由度。Yoshikawa (1993) 描述了一个 Macro-Micro 系统。在柔性的大操作器末端装一个刚性的小操作器。大范围快速运动由大操作器完成，而精确的定位则靠小操作器，利用冗余的自由度，在规划关节的跟踪轨迹时，可使大操作器运动时变形尽可能小，从而减轻小操作器的补偿动作。

2) 命令的处理。适当地对给定输入作预处理，可做到尽可能不激发柔性连杆的主要振型模态，这是 Singer (1990) 提出的概念。最简单的做法是把给定命令分成两部分，其中一部分延迟一段时间才输入。延迟时间正好等于要抑制的主要振型的半周期。近期对命令预处理的研究工作仍不断有报导。

3) 反馈控制。按检测器和执行器安装的位置是否相同，控制方法可分为并置的和非并置的。并置控制时，检测器与伺服电机同轴。命令给定的是连杆末端的运动轨迹。在并置控制下，虽然可用观测器得到全部状态信息，但存在问题：i) 当受到不确定的因素影响时，由电机轴角位置不能准确推算出连杆末端位置；ii) 仅靠角位置构成 PD 控制，未必能对高频振动有良好的控制作用。对于非并置控制，检测器安装在连杆的末端，由此构成的被控对象是非最小相位的，而且右半平面的零点位置和检测器安装的位置有关。这样的对象是较难控制的。

目前还未有一种控制方法能适用于各种情况。在文献中常常综合运用几种控制方法。对某些柔性连杆机器人，反馈线性化是可行的。Wang 等 (1991) 指出，对某些模型，输入/状态线性化的必要条件不能满足，而输入/输出线性化得到不稳定的零动力学，适当地构成输出量是关键。反馈线性化需要有精确的数学模型。对于有界的不确定因素，采用鲁棒控制可使柔性机器人稳定，但未必有良好的动态性能。假如弹性变形较小，可以用奇异摄动方法将系统分解为快时间子系统和慢时间子系统。慢系统可用计算力矩方法控制。快系统描述了弹性变形，是线性系统，故可用 LQR 或极点配置方法设计控制器。这些方法存在的问题是对模型敏感，以及需要全部状态信息。

由于柔性连杆模型的复杂性，实现其自适应控制，在理论上和实践上都有较大的难度。现已有自校正控制和模型参考自适应控制研究的报导。

### 3 柔性关节与柔性连杆机器人

Yang 和 Fu (1993) 讨论关节和连杆都有柔性的情况。使用两参数的奇异摄动方法，把系统分解成快、中、慢等三个不同时间尺度的子系统，其中慢系统对应刚性运动。当连杆的刚度比关节的刚度大时，连杆变形是快子系统，并且是不能控的，因而其振动只能靠固有的阻尼使之衰减。对于其他情况，则可以对各子系统分别设计控制器。

#### 4 问题与展望

当前对柔性机器人控制的研究十分活跃, 1993年在亚特兰大召开的 IEEE 国际机器人与自动化大会上, 有关柔性机器人的专题小组有六个之多. 从会议论文可以看出, 一些新的方法, 如学习控制、智能控制(包括神经网络控制与模糊逻辑控制)等方法已经应用于柔性机器人的控制研究中, 且取得较好的效果. 奇异摄动法、鲁棒反馈线性化、自适应控制以及观测器设计等方面的理论研究与实验都有进展. 但仍存在许多问题有待深入研究, 如零动力学稳定性、加入观测器的整个系统的稳定性等. 柔性机器人的力/位控制问题最近已引起研究人员的注意.

柔性机器人由于重量轻、功耗小、运动灵活, 在工业、医学、航空、军事等部门有许多特殊用途. 随着理论和控制技术研究的深入, 其应用范围也会不断扩大. 未来十年将是这一前沿研究领域高速发展的时期.

#### 参 考 文 献

- [1] Spong, M. . The Control of Flexible Joint Robots, A Survey, in *New Trends and Application of Distributed Parameter Control Systems*, G. Chen et al. , Eds. , Marcel Dekker Publisher, New York, 1991
- [2] 刘连忠, 汪一彭. 弹性关节机器人的控制. *机器人*, 1990, (1), 51—57
- [3] Book, W. J. . Modeling, Design and Control of Flexible Manipulator Arms; A Tutorial Review. *Proc. 29th CDC*, 1990, 500—506

## 具有结构式和非结构式摄动的反馈系统的鲁棒稳定性

田玉平

(东南大学自动化研究所·南京, 210018)

### 1 引 言

不确定线性系统的鲁棒性分析是现代控制理论中的重要课题之一. 目前的研究主要集中在以下两类不确定性上. 第一类是所谓的非结构式不确定性, 一般用有界范数来描述. 分析这类不确定系统的基本工具是小增益定理<sup>[1]</sup>. 第二类是结构式(参数)不确定性. 近年来, 受著名的 Kharitonov 定理<sup>[2]</sup>的推动, 参数不确定系统的研究有了很大发展. 在实际问题中, 上述两类不确定性常常是同时存在的. 因此, 一个挑战性的问题是如何分析这类具有混合型摄动的不确定系统. Doyle 的结构奇异值( $\mu$ )方法被认为是处理这类问题的有效方法之一<sup>[3,4]</sup>. 但我们知道在系统具有实参数摄动时,  $\mu$  的计算是非常困难的. 文[5]考虑了具有非结构式摄动和独立系数摄动的单变量系统的稳定性, 得到了类似于 Kharitonov 定理的所谓鲁棒小增益定理. 文[6]则考虑同时具有非结构式摄动和线性相关系数摄动的情况, 通过构造一个  $H(\omega)$  测示函数来检验闭环系统的鲁棒稳定性. 为在每个频率点  $\omega$  处求  $H(\omega)$ , 必须分别对  $\delta \in [0, 1]$  和  $\varphi \in [0, 2\pi]$  寻优. 文[7]利用奇异值分析考虑了一类具有混合不确定性的多变量系统, 不过同样要解一个凸优化问题. 我们在本文中首先给出判别闭环系统鲁棒稳定性的一个顶点-棱边型判据. 然后通过引入最大顶点相位差的概念, 使得具有混合不确定性的一类多变量系统的鲁棒稳定性(或稳定裕度)可得到精确检验.

### 2 问题描述和预备知识

我们首先给出符号记法. 记  $\mathcal{H}$  为所有 Hurwitz 多项式的集合,  $\text{RH}_\infty$  为所有稳定的实有理传递函数矩阵的集合. 设  $\mathcal{D}$  为一个  $n$  阶 Hurwitz 多项式凸多面体, 即

$$\mathcal{D}_i = \text{conv}(\mathcal{D}_i), \quad (1)$$

这里

$$\mathcal{D}_i = \{d_i(s); \quad i = 1, \dots, r\} \quad (2)$$

是  $\mathcal{D}$  的顶点集合, 多项式  $d(s)$  在  $s=j\omega$  点的值集<sup>[9]</sup> 定义为

$$V_d(\omega) := \{d(j\omega); \forall d(s) \in \mathcal{D}\}. \tag{3}$$

由于  $V_d(\omega)$  是复平面中不包含原点的一凸多边形<sup>[9]</sup>, 故有

$$\min_{d(s) \in \mathcal{D}} |d(j\omega)| = \min_{d(s) \in \mathcal{D}} |d(j\omega)|, \quad \forall \omega \geq 0, \tag{4}$$

其中  $\mathcal{D}$  表示凸多面体  $\mathcal{D}$  的一维棱边集<sup>[10]</sup>.

设  $\mathcal{N}^M$  为一个  $m \times l$  多项式矩阵凸多面体, 即

$$\mathcal{N}^M := \text{conv}(\mathcal{N}_i^M), \tag{5}$$

这里

$$\mathcal{N}_i^M := \{N_i(s); i = 1, \dots, q\} \tag{6}$$

是  $\mathcal{N}^M$  的顶点集合, 根据文[7]可得到下面的关系

$$\max_{N(s) \in \mathcal{N}^M} \bar{\sigma}(N(j\omega)) = \max_{N(s) \in \mathcal{N}_i^M} \bar{\sigma}(N(j\omega)), \quad \forall \omega \geq 0, \tag{7}$$

其中  $\bar{\sigma}(\cdot)$  表示  $(\cdot)$  的最大奇异值.

下面我们考虑如下不确定系统:

设  $\Delta$  为非结构性摄动,  $\Delta(s) \in \text{RH}_\infty$ ,  $\|\Delta\|_\infty \leq 1$ ,  $G(s) \in \mathcal{G}$ , 其中  $\mathcal{G}$  表示如下含参数摄动的不确定传递函数矩阵族:

$$\mathcal{G} := \{G(s) = \frac{N(s)}{d(s)}; N(s) \in \mathcal{N}^M, d(s) \in \mathcal{D}\}, \tag{8}$$

这里  $\mathcal{D}, \mathcal{N}^M$  分别由(1)和(5)定义. 上述不确定闭环系统鲁棒稳定的充要条件是

$$\max_{G \in \mathcal{G}} \|G\|_\infty < 1. \tag{9}$$

由(4), (7)和(9)不难得到下面的定理.

**定理 1** 当且仅当不等式

$$\frac{\max_{N(s) \in \mathcal{N}_i^M} \bar{\sigma}(N(j\omega))}{\min_{d(s) \in \mathcal{D}} |d(j\omega)|} < 1$$

对所有  $\omega \geq 0$  都成立时, 图 1 所示系统对所有的  $\Delta(s) \in \text{RH}_\infty$ ,  $\|\Delta\|_\infty \leq 1$  和  $G(s) \in \mathcal{G} \subset \text{RH}_\infty$  是稳定的.

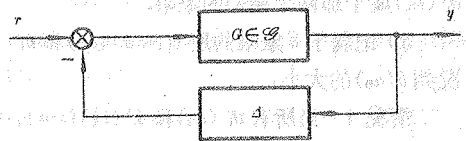


图 1 不确定反馈系统

### 3 多变量系统的鲁棒稳定性检验

上节中我们给出了判断闭环系统鲁棒稳定性的充要条件, 然而, 直接由该条件判别系统稳定性所需的计算量是非常大的, 这是因为:

1) 必须检验多项式族  $\mathcal{D}$  的鲁棒稳定性. 根据棱边定理<sup>[10]</sup>, 这意味着必须且只须检验  $\mathcal{D}$  的所有棱边的稳定性.

2) 在每一频率点解优化问题:  $\min_{d(s) \in \mathcal{D}} |d(j\omega)|$ .

当系统不确定参数的个数增加时, 凸多面体  $\mathcal{D}$  的棱边数将急剧增加. 因此 1) 和 2) 常常会带来所谓的“组合爆炸”问题.

下面我们引入最大顶点相位差的概念, 利用最大顶点相位差我们可以很方便地解决上述问题.

记  $\text{Sect}(\theta)$  为复平面中顶点在原点、扇角为  $\theta$  的扇形. 并记

$$\bar{\sigma}_m := \max_{N(s) \in \mathcal{N}_i^M} \bar{\sigma}(N(j\omega)), \tag{10}$$

则最大顶点相位差定义如下:

$$\theta_m := \max_{\omega > 0} \theta(\omega) = \max_{\omega > 0} \min_{0 < \theta < \pi} \{\theta; d(j\omega) + \bar{\sigma}_m e^{j\theta} \in \text{Sect}(\theta)\}, \quad \forall d(s) \in \mathcal{D}, \quad \forall \theta \in [0, 2\pi]. \tag{11}$$

**定理 2** 图 1 所示闭环系统对所有  $\Delta(s) \in \text{RH}_\infty$ ,  $\|\Delta\|_\infty \leq 1$  和  $G(s) \in \mathcal{G}$  鲁棒稳定的充要条件是

$$\theta_m < \pi.$$

下面我们来看  $\theta(\omega)$  的几何解释以及求取  $\theta_m = \max_{\omega \geq 0} \theta(\omega)$  的算法.

显然,集合  $\{d(j\omega) + \bar{\sigma}_m e^{j\phi}; \phi \in [0, 2\pi]\}$  对应于复平面中以  $(\operatorname{Re}(d(j\omega)), \operatorname{Im}(d(j\omega)))$  为圆心、以  $\bar{\sigma}_m$  为半径的圆周. 如果我们分别以凸多边形  $V_s(\omega) = \{d(j\omega); \forall d(s) \in \mathcal{D}\}$  的各个顶点为圆心画半径为  $\bar{\sigma}_m$  的圆, 则根据  $\theta(\omega)$  的定义知,  $\operatorname{Sect}(\theta(\omega))$  是包含所有这些圆周的最小扇域. 对于给定的  $d_i(s) \in \mathcal{D}$ , 记  $\operatorname{Sect}(\theta_i^-(\omega), \theta_i^+(\omega))$  为包含单个圆周  $\{d_i(j\omega) + \bar{\sigma}_m e^{j\phi}; \phi \in [0, 2\pi]\}$  的最小扇域, 由图 2 看出,  $\theta_i^-(\omega)$  和  $\theta_i^+(\omega)$  可由下式求出

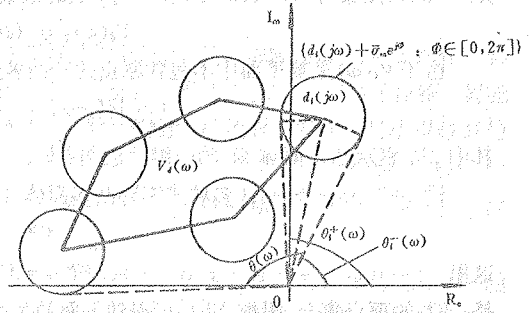


图 2  $\theta(\omega)$  的几何解释

$$\begin{cases} \theta_i^-(\omega) = \arg(d_i(j\omega)) - \arcsin \frac{\bar{\sigma}_m}{|d_i(j\omega)|}, \\ \theta_i^+(\omega) = \arg(d_i(j\omega)) + \arcsin \frac{\bar{\sigma}_m}{|d_i(j\omega)|}. \end{cases} \quad (12)$$

其中  $\arg(\cdot)$  表示  $(\cdot)$  的相角,  $0 \leq \arg(\cdot) \leq 2\pi$ .

下面是计算  $\theta_m = \max_{\omega \geq 0} \theta(\omega)$  的一种简单算法.

1) 对于给定的  $\omega_0$ , 计算  $d_i(j\omega_0)$ ,  $\bar{\sigma}_m = \max_{N(\omega) \in \mathcal{N}_p} \bar{\sigma}(N(j\omega_0))$ . 然后, 根据 (12) 计算  $\theta_i^-(\omega_0)$  和  $\theta_i^+(\omega_0)$ ,  $i=1, \dots, r$ .

2) 判断  $\theta_i^-(\omega_0)$  和  $\theta_i^+(\omega_0)$  属于哪个象限. 如果  $\theta_i^-(\omega_0)$  或  $\theta_i^+(\omega_0)$  恰好落在坐标轴上, 则认为  $\theta_i^-(\omega_0)$  或  $\theta_i^+(\omega_0)$  属于那两个相邻的象限.

3) 记属于  $h$  象限的所有的  $\theta_i^-(\omega_0)$  和  $\theta_i^+(\omega_0)$  中最大者为  $\Phi_h^+(\omega_0)$ , 最小者为  $\Phi_h^-(\omega_0)$ . 根据以下三种情况判  $\theta(\omega_0)$  的大小:

情况 1 当所有  $\theta_i^-(\omega_0)$  和  $\theta_i^+(\omega_0)$  ( $i=1, \dots, r$ ) 均落在某一个或某两个相邻象限中时,  $\theta(\omega_0) < \pi$ ;

情况 2 当所有  $\theta_i^-(\omega_0)$  和  $\theta_i^+(\omega_0)$  ( $i=1, \dots, r$ ) 落在四个象限中时,  $\theta(\omega_0) \geq \pi$ ;

情况 3 当所有  $\theta_i^-(\omega_0)$  和  $\theta_i^+(\omega_0)$  ( $i=1, \dots, r$ ) 落在三个或两个对顶象限中时,  $\theta(\omega_0)$  由下式确定:

$$\theta(\omega_0) = \min(\Phi_{h+2}^+ - \Phi_h^-, 2\pi - \Phi_{h+2}^- + \Phi_h^+),$$

其中, 当 1, 3 象限中有  $\theta_i^-(\omega_0)$  或  $\theta_i^+(\omega_0)$  时,  $h=1$ ; 当 2, 4 象限中有  $\theta_i^-(\omega_0)$  或  $\theta_i^+(\omega_0)$  时,  $h=2$ ;

4) 如果  $\theta(\omega_0) < \pi$ , 改变  $\omega_0$ , 重复上述步骤, 直到  $\omega_0$  足够大; 如果  $\theta(\omega_0) \geq \pi$ , 则系统非鲁棒稳定, 算法终止.

上述算法充分显示了引入最大顶点相位差  $\theta_m$  所带来的便利. 我们不需解优化问题, 而只需在有限个顶点上检验某种相位条件. 另外, 按该算法不需再检验多项式凸多面体  $\mathcal{D}$  的顶点或棱边的稳定性. 这是因为, 如果  $\theta(\omega) < \pi$ , 则  $0 \notin V_s(\omega)$ ,  $\forall \omega \geq 0$ . 根据刻零原则<sup>[9]</sup>, 这意味着  $\mathcal{D}$  是鲁棒稳定的.

当不确定参数以多线性方式进入对象的分子多项式的系数中时, 利用映射定理<sup>[11]</sup>可以证明, 定理 2 (以及相应的算法) 给出了系统鲁棒稳定的充分条件. 更进一步地, 若多线性相关结构满足文<sup>[8]</sup>所给出的条件, 则不等式  $\theta_m < \pi$  是闭环系统鲁棒稳定的充要条件.

#### 4 应用举例

应用本文所给算法不仅可判断系统鲁棒稳定性, 还可以计算系统不确定参数的最大摄动界, 限于篇幅具体算例从略.

#### 5 结束语

本文给出了检验不确定多变量反馈系统鲁棒稳定性的一种简单而有效的方法. 进一步的研究将是具有混合型不确定性系统的综合设计问题. 这方面的研究和鲁棒性分析一样, 也大致分两条路走. 一是用块

对角模型反映系统的不确定性<sup>[4]</sup>,然后对系统进行 $\mu$ 综合.另一条路是以系统族为模型,同时考虑非结构式摄动,研究所谓的参数化 $H_\infty$ 问题.两种方法目前均处于初创阶段,仍有许多问题亟待解决,相信在今后几年时间里这方面的研究会有较大发展.

### 参 考 文 献

- [1] Vidyasagar, M. . Control System Synthesis; A Factorization Approach. MA, MIT Press, Cambridge, 1985
- [2] Kharitonov, V. L. . Asymptotic Stability of An Equilibrium Position of A Family of Systems of Linear Differential Equations. *Differentsial'nye Uravnenija*, 1978, 14(11):2086—2088
- [3] Doyle, J. C. . Analysis of Feedback Systems with Structured Uncertainties. *Proc. IEE, Part D*, 1982, 129:242—250
- [4] Fan, M. K. H. , Tits, A. L. and Doyle, J. C. . Robustness in the Presence of Mixed Parametric Uncertainty and Unmodeled Dynamics. *IEEE Trans. Automat. Contr.* , 1991, AC-36:25—38
- [5] Chapellat, H. , Dahleh, M. and Bhattacharyya, S. P. . Robust Stability Under Structrued and Unstructrued Perturbations. *IEEE Trans. Automat. Contr.* , 1990, AC-35:1100—1108
- [6] Barmish, B. R. and Khargonekar, P. P. . Robust Stability of Feedback Control Systems with Uncertain Parameters and Unmodeled Dynamics. *Proc. Amer. Contr. Conf.* , 1988, 1857—1862
- [7] Zhou, K. and Gu, G. . Robust Stability of Multivariable Systems with both Real Parametric and Norm Bounded Uncertainties. *IEEE Trans. Automat. Contr.* , 1992, 37:1533—1537
- [8] Tian Yu-Ping, Feng Chun-Bo and Xin Xin. Robust Stability of Polynomials with Multilinearly Dependent Coefficient Perturbations. *IEEE Trans. Automat. Contr.* , 1993, 38;
- [9] Barmish, B. R. . A Generalization of Kharitonov's Four-Polynomial Concept for Robust Stability Problems with Linear Dependent Coefficient Perturbations. *IEEE Trans. Automat. Contr.* , 1989, AC-34:157—165
- [10] Bartlett, A. C. , Hollot, C. V. and Huang, L. . Root Locations for an Entire Polytope of Polynomials; It Suffices to Check the Edges. *Math. for Contr. Signals and Systems*, 1988, 1:61—71
- [11] Zadeh, L. A. . *Linear System Theory*. New York, McGraw-Hill, 1963

## 复杂控制系统的对称性及相似性结构\*

张嗣瀛

(东北大学自动控制系·沈阳, 110006)

我们着重考察自然发展和形成的复杂控制系统,如生物系统(特别是“人”)、社会系统、管理系统等.这类系统在其发展过程中,需要适应外界环境,并力求以最佳状态行动,故应是“自寻最优地”逐渐演化而形成其结构.我们注意到这些都是智能控制系统.

这类系统的结构有明显的共性和特征,例如对称性(人,生物,…)、相似性(如一个国家的中央、省、市、县的组织结构相似;工业、企业、军队的组织管理机构的层次相似等),还可能其他结构.

生物系统的相似性在我国针灸医疗系统中早已察觉并被应用,人体经络的穴位分布是由不同层次的与总体(人体)相似的子系统构成的.例如人耳,形如卧婴(胎儿),其上穴位与人体对应.全身各相应部位的穴位也与人体对应.山东大学张颖清教授在他提出的“生物全息律”中指出了更广泛的动植物系统的相似性[1, 2],钱学森教授认为张提出了“生物是由若干相似的中间层次结构所组成的[1](其中的“序”),但张不研究控制问题,也不研究工业社会、经济、管理等系统.

\* 国家自然科学基金资助项目.



仅就对称性、相似性来看,一个自然形成的大系统,似由具有对称和相似结构的不同层次的子系统构成的.若这种结构的形式为最佳,那末,其优点何在?具有那些性质、功能?各层次间以何种形式具体构成以及作用机理如何?由功能不同的子系统所构成的大系统又有何种不同质的功能呢?…这些问题都远未清楚.

用这种观点研究控制系统的对称性及相似性结构,在国内外似尚未见到.

在工业及其他领域中,也存在具有对称性和相似性结构的控制系统,下面举几个例子.

1) 今有一发电厂,由  $N$  个相同的机组以同一方式互联构成,电厂又并入一更大的电力网,后者用一等价机组表示<sup>[3]</sup>.

此系统在工作点(对应于发电量的一额定稳态值)附近线性化后,分别用下列方程描写:

网: 
$$\dot{x}_0 = A_0 x_0 + \sum_{j=1}^N H_1 x_j \tag{1}$$

厂: 
$$\dot{x}_i = A x_i + H_2 x_0 + \sum_{j=1}^N H x_j + b u_i \tag{2}$$

或写成 
$$\dot{x} = \bar{A} x + \bar{B} u, \tag{3}$$

$$y = C x. \tag{4}$$

其中

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A_0 & H_1 & \cdots & H_1 \\ H_2 & A & H & \cdots & H \\ \vdots & H & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & H \\ H_2 & H & \cdots & H & A \end{bmatrix}, \tag{5}$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ b & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & b & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & b \end{bmatrix}, \tag{6}$$

$C$ : 据对输出的要求而定. (7)

这里

$H_1$ ——各机组对电网的关联作用;  $H$ ——机组内其他机组对某一机组的关联作用;  $H_2$ ——电网对某一机组的关联作用.

以  $N=2$  为例,可用图 1 表示系统的对称结构及各部相互之间的关联作用.

形式如  $\bar{A}$  的矩阵,就是对具有对称结构组合大系统的一种表达.

还可举出一些类似于结构  $\bar{A}$  的系统.

2) 双提升<sup>[4]</sup>.

用两架直升飞机提升物体,较用一架飞机提升,可使稳定性增大,这是一种动态对称性.

当一物体重量不大时,用一架飞机提升运送,不论在军事上还是商业上,都经常采用,但当提升载荷增大时,欲单机提运须使用更大型和更昂贵的飞机,且载荷的增大没有上限,建造更大型的飞机却受到限制.因此,双机提运的方案,看来对于实用是重要的,但双机提运对驾驶员将提出更高的要求.

双机提运的情况如下:

此系统如图 2 所示,  $L_2$  是一刚性杆,  $L_1$  是绳索,其长度是一重要参数,影响提升性能.载荷看作是

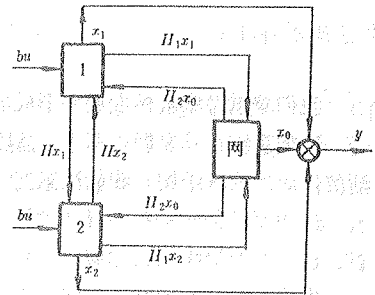


图 1 电网

位于横杆中心的质点,且直升飞机的动态方程是线性的,整个系统的模型可写成

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & H \\ -H & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中直升飞机动态方程的形式是

$$\dot{z} = Ax + Bu, \quad (9)$$

阵  $H$  表示两子系统间的关联,  $H$  含参数  $L_1, L_2$  的效应.

在此例中,  $\bar{A}$  的形式为

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & H \\ -H & A \end{bmatrix}. \quad (10)$$

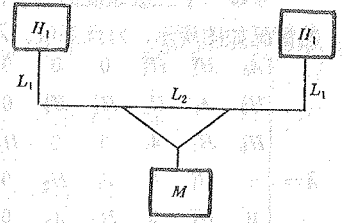


图2 双机提升

### 3) $C^0I$ 系统的例子<sup>[4]</sup>

今考虑舰队、机群如何保持编队的队形问题. 设有一航空母舰, 由驱逐舰舰队护航. 为简单起见, 设只有四艘驱逐舰, 位于航空母舰的四边, 分布如图3, 欲保持队形, 各舰之间必须有信息交换, 例如通报位置, 航向、航速、接受指令等. 但由于安全上及技术上的要求, 信息通道的数目受到限制, 今设通讯只在相邻的舰支之间进行.

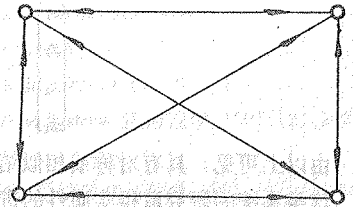


图3 舰队护航

舰支的动态方程为

$$\dot{x} = Ax_i + Bu_i, \quad i = 1, \dots, 4, \quad (11)$$

整个系统的模型将为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & H & H & H \\ H & A & H & H \\ H & H & A & H \\ H & H & H & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$H$  表示由于信息交换而导致的动态关联.

在此例中,  $\bar{A}$  的形式为

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & H & H & H \\ H & A & H & H \\ H & H & A & H \\ H & H & H & A \end{bmatrix}, \quad (13)$$

此模型可允许去掉一个节点, 这表示可损失一艘驱逐舰.

4) 由行动特性相同(或相似)的子系统, 互联组合成大系统, 这种结构形式, 在许多其他领域中也都出现, 例如<sup>[5]</sup>:

将相同机床组合, 大规模生产同类小部件; 大规模并行计算; 人工神经网络; 计算机网络局部区域中的星拓扑; ...

这类结构的典型形式就是由上式(13)的  $\bar{A}$  表示其结构的那类系统.

以上所举这些例子中的结构形式自然还可有相应的变化.

例如非线性系统, 即由若干相同的非线性子系统互联组合成大系统.

相同的子系统也可由相似子系统代替.

也可只在局部结构中有相同或相似的子系统, 等等.

由子系统组合成的大系统还可有不同的层次, 例如前面发电厂的例子就是一个二级系统, 电网是上一级.

今举一个三级系统的例子,如图4,各级之间关联的情况如图所示,对此系统,  $\bar{A}$  的形式如下

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A_0 & H_1^0 & H_1^0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_1^0 & A_1 & H_1 & H_2 & H_2 & 0 & 0 \\ H_1^0 & H_1 & A_1 & 0 & 0 & H_2 & H_2 \\ 0 & H_1^0 & 0 & A_2 & H_2 & 0 & 0 \\ 0 & H_1^0 & 0 & H_2 & A_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_1^0 & 0 & 0 & A_3 & H_2 \\ 0 & 0 & H_1^0 & 0 & 0 & H_2 & A_3 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

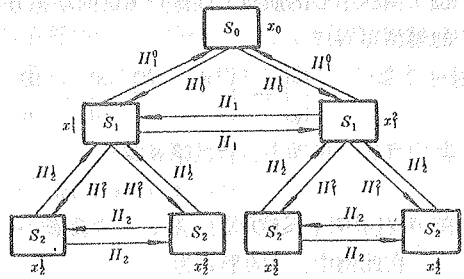


图4 三级系统

这也是一种具有对称或相似结构的系统。

如果几个子系统平行关联,还可组成如下的系统(图5)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & H & & \\ H & A_2 & H & \\ & H & A_3 & H \\ & & H & A_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ u \\ u \\ u \end{bmatrix}, \quad (15)$$

由以上可见,具有对称或相似结构的系统有广泛的代表性,如果对此类系统的研究取得实质性的进展,将有重要的理论和实际意义及我们自己的特色。

上面所提出的问题,应是一个长期研究的课题。

在开展研究的初期阶段,我们先从现有的基础起步。例如先研究这类系统的能控、能观性、稳定性、分解、解耦, ... 等问题,然后再研究新性质的问题,又如,就对称性及相似性结构而言,对称性结构在国外已有一些人做过研究,当然,其出发点不同,因此,可先研究具有对称结构的系统。相似性则极少有人研究,可在下一步进行。

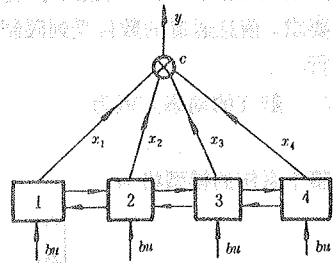


图5 平行关联系统

在所使用的工具方面,由于我们着重研究非线性系统,因此主要使用了微分几何方法,自然还要探索其他可能的工具,如代数,图论,分形(fractal)<sup>[6,7]</sup>等。分形研究自相似结构的事物,但此理论中的定量研究还只限于对分形维数的计算。

我们在此方向组织了每周一次的讨论班,已进行了三年半,参加人员含教授三名,副教授四名,其中有博士后一人,博士毕业生三人,此外,还有所指导的博士生及硕士生。

前一阶段对具有对称结构系统的研究所取得的结果大体有以下几方面:对称性结构可使非线性系统能控性的判别方法简化;给出了更为简捷的线性化条件及算法;较详细地研究了对称系统的结构分解,使对称系统可分解简化为一些低阶的子系统,以及对称结构的形式决定了化简的形式,初步探讨了对称结构与稳定性的关系,并对某些特殊类型的系统(线性系统,仿射系统)进行了研究,发现对称结构可使稳定区扩大;对线性相似组合大系统研究了最优控制问题和输出调节问题,等等。

这些有关研究的部分论文目录附后。

### 参 考 文 献

[1] 张嗣瀛,王景才,刘晓平.微分几何方法与非线性控制系统——讲座连载.信息与控制.1992,(1-5):37-42,101-106,162-166,229-234,288-294  
 [2] 刘晓平.Output Regulation of Strongly Coupled Symmetric Composite Systems. Automatica, 1992, 28(5):1037-1041  
 [3] 刘晓平.Optimal Control Problems for Large Scale Composite Systems with Similarity. Control-Theory and Advanced Technology, Accepted.

- [4] 赵军,张嗣瀛. On the Controllability of Nonlinear Systems with Symmetry. *Systems & Control Letters*, 1992, (6): 445—448
- [5] 刘晓平,王景才,张嗣瀛. The Canonical Form of Uncontrollable Nonlinear Control Systems. *Science in China, Series A*, 1992, 35(5): 113—120(中国科学 A 辑)
- [6] 赵军,张嗣瀛. 非线性控制系统的广义对称性与可控性. *科学通报*, 1991, 36(18): 1426—1430
- [7] 谢小信,刘晓平,张嗣瀛. 对称非线性控制系统的结构分解. *自动化学报*, 1992, 18(2): 151—157
- [8] 谢小信,刘晓平,张嗣瀛. 广义系统的状态空间结构. *自动化学报*, 1993, 19(2): 253—256
- [9] 刘晓平,张嗣瀛. 对称非线性控制系统的能控性. *控制理论与应用*, 1991, 8(4): 452—455
- [10] 刘晓平. The Global Structure of Discrete-Time Nonlinear Control Systems with Symmetries. *控制理论与应用* 1993, 10(6): 617—624
- [11] 谢小信,刘晓平,张嗣瀛. 对称非线性系统的结构简化. *控制理论与应用*, 1992, 9(2): 124—128
- [12] 谢小信,刘晓平,张嗣瀛. 双线性系统; 对称代数的构造. *控制理论与应用*, 1993, 10(2): 230—234
- [13] 谢小信,刘晓平,张嗣瀛. 双线性系统的三角化条件. *控制理论与应用*, 1993, 10(4): 466—468
- [14] 李中华,张嗣瀛. 对称一般非线性系统的反馈解耦. *控制理论与应用*, 1991, 8(1)
- [15] 赵军,张嗣瀛. 关于非线性系统的对称性、可达性与可控性. *控制理论与应用*, 1992, 9(2): 148—154
- [16] 赵军,张嗣瀛. A Sufficient Condition of Local Strong Controllability for Affine Systems. *应用数学*, 1993, (2): 207—211
- [17] 谢小信,刘晓平,张嗣瀛. 二阶旋转对称非线性系统的结构和性质的研究. *系统科学与数学*, 1993, 13(2): 120—127
- [18] 李中华,张嗣瀛. 对称仿射非线性系统的无交互控制. *控制与决策*, 1991, 6(6): 453—456
- [19] 赵平,张嗣瀛. 广义对称非线性控制系统的可逆性条件. *控制与决策*, 1992, (6): 409—414
- [20] 刘晓平. 对称非线性控制系统的能控分解. *控制与决策*, 1992, 7(1): 63—66
- [21] 刘晓平. 系统的对称结构与干扰解耦. *东北大学学报*, 1992, (3)
- [22] 刘晓平,张嗣瀛. Stackelberg Solutions for Nonlinear Games with Symmetries. *Proc. of ACC, Massachusetts*, 1991, (1): 278—378
- [23] 李中华,张嗣瀛. Feedback Decoupling for Affine Nonlinear Systems Possessing Symmetries. *Proc. of ACC, USA*, 1991
- [24] 杨伟林,张嗣瀛. Rotation Symmetry in Nonlinear Control Systems and Related Control Structure. *Proc. 27th IEEE CDC, Austin USA*, 1988
- [25] 赵军,张嗣瀛. Symmetries and Realizations of Nonlinear Systems. *Proc. of 31st IEEE CDC*, 1992, 86—89
- [26] 赵军,张嗣瀛. Feedback Symmetrization of Nonlinear Systems. *Proc. of 31st IEEE CDC*, 1992, 102—103
- [27] 杨伟林,张嗣瀛. A Kind of Nonlinear Systems and Its Reduction and Structural Control. *Proc. 9th International Conference, Antibes France*, 1990
- [28] 杨伟林,张嗣瀛. Rotation Symmetric Structure in Control Systems and Related Stability Analysis. *Proc. 9th International Conference, Antibes France*, 1990
- [29] 李中华,张嗣瀛. Noninteracting Control for Nonlinear Systems Possessing Symmetries. *Proc. of the Pre-conference to MINS, Hangzhou, China*, 1991
- [30] 赵军,张嗣瀛. On the Reachability of Nonlinear Systems with General Symmetries, In *Control Theory, Stochastic Analysis and Applications*. World Scientific Publishing Company, 1991, 150—155
- [31] 郑毅,张嗣瀛. The Decomposition and Feedback Equivalence for Nonlinear Systems. *Proc. of IFAC Symposium on LSS'92, Beijing, China*, 1992
- [32] 井元伟,王景才,张嗣瀛. Quotient Similarity and Controllability of Nonlinear Systems Possessing Symmetries. *Preprints of 12th IFAC World Congress, Australia*, 1993
- [33] 刘晓平,赵春祥,张嗣瀛. Symmetries on Differential Games. *Preprints of 12th IFAC World Congress, Australia*, 1993
- [34] 杨光红,张嗣瀛. Qualitative Analysis and Decentralized Controller Synthesis for a Class of Large-Scale Systems Contain-

- ing Multipartite Symmetrically Composite Subsystems. Preprints of 12th IFAC World Congress, Australia, 1993
- [35] 赵军, 张嗣瀛. Small Time Local Controllability of Bilinear Control Systems. Preprints of 12th IFAC World Congress, Australia, 1993
- [36] 赵军, 张嗣瀛. Symmetries and Lower Dimensional Realizations of Nonlinear Systems. Preprints of 12th IFAC World Congress, Australia, 1993
- [37] 郑毅, 张嗣瀛. The Decomposition for Large Nonlinear System. Proc. of IFAC Symposium on LSS'92, Beijing, China, 1992
- [38] 刘晓平, 王景才, 张嗣瀛. The Disturbance Decoupling Problems for Nonlinear Control Systems with Symmetries. Proc. of SICE, 1989
- [39] 谢小信, 刘晓平, 张嗣瀛. The Structure of Symmetric Nonlinear Control Systems Under The  $s$ -Coordinates, European Control Conference, Grenoble, France, 1991, 7, 2-5
- [40] 谢小信, 刘晓平, 张嗣瀛. The Structure of Stability of Systems with Rotation Symmetries. IMAACS-MCTS symp., May, Casablanca, Morocco, 1991
- [41] 谢小信, 刘晓平, 张嗣瀛. The Symmetry and Optimal Control of Nonlinear Control Systems. Pre-Conference to MINS-91, June Hangzhou, China, 1991
- [42] 谢小信, 刘晓平, 张嗣瀛. The Cascade Decomposition of Symmetric Nonlinear Control Systems. IASTED International Symposium Circuits and Systems, Zurich, Switzerland, July, 1991
- [43] 李中华, 张嗣瀛. Feedback Decoupling for General Nonlinear Systems. Proc. of AMSE Signal & Systems, Chengdu, China, 1990
- [44] 李中华, 张嗣瀛. Feedback Decoupling and Noninteracting Control of General Nonlinear Systems. Proc. of MACS-MCTS Symposium, Morocco, 1991
- [45] 李中华, 张嗣瀛. The Decomposition of General Nonlinear Systems Possessing Partial Symmetries. Proc. of the Int. Conf. on Signals and Systems, Warsaw, Poland, 1991
- [46] 李中华, 张嗣瀛. Feedback Decoupling for General Nonlinear Systems Possessing Symmetries. Proc. of Int. Conf. on Information & Systems, Hangzhou, 1991
- [47] 杨伟林, 张嗣瀛. A New Near-Optimal Control Method and Its Algorithm for Large-Scale Nonlinear Dynamical Systems. Paper on 7th IFAC Workshop, Tbilisi, USSR, 1988
- [48] 杨伟林, 张嗣瀛. Rotation Symmetry, Structure and Controllability Analysis. Paper on IASTED Internation Symp., Innsburck Austria, 1990
- [49] 赵军, 张嗣瀛. Output-Symmetries and Reduced Dimensional Realization of Nonlinear Systems. Proc of IMACS-MCTS Symposium, 1990
- [50] 赵军, 张嗣瀛. Symmetric Structure and Its Application to General Linearization of Affine Systems. Proc. of ASIA-PACIFIC Conf. on Measurement & Control, 1991, (2): 587-589
- [51] 赵军, 张嗣瀛. On the AC-DC Transmission Systems stabilization. Proc. of IASTED Int. Symposium of Circuits and Systems, 1991
- [52] 赵军, 张嗣瀛. Nonlinear Quadratic Regulators for Large Scale Systems. Singapore Int. Conf. on Intelligent Control and Instrumentation, Singapore, 1992
- [53] 刘晓平, 张嗣瀛. The Local Structure of Discrete-Time Nonlinear Control Systems with Symmetries. Accepted by the IASTED Int. Conf. Control'90, Lugano, Switzerland, June, 1990
- [54] 刘晓平, 赵春祥, 张嗣瀛. Optimal Solutions for Differential Games Possessing Symmetries; A Differential Geometric Approach. Accepted by IMACS-MCTS Symp., Casblana, Morocco, May, 1991
- [55] 郑元, 刘晓平, 张嗣瀛. Structure Simplification of a Kind of Symmetrical Nonlinear Systems. Int. Conf. on Systems Science, Wroclaw, Poland, 1991
- [56] 谢小信, 刘晓平, 张嗣瀛. The State Structure of Generalized Control Systems with Symmetries. IFAC Workshop of Mutual Impact of Computer Power and Control Theory, Prugul, Gechoslovakia, Sept. 1992

- [57] 谢小信, 刘晓平, 张嗣瀛. Symmetrization of Nonlinear Control Systems Via Feedback. SIAM Conf. on Contr. and Its Appl. Minneapolis, Minnesota, Sept. 1992
- [58] 井元伟, 单泽勇, 王景才, 张嗣瀛. Similar Structure Decomposition for a Kind of Hierarchical Systems. Proc. of SICE, Japan, 1992

## 制造系统中的随机生产控制系统\*

涂奉生

(南开大学计算机与系统科学系·天津, 300071)

### 1 引言

制造业是各国的支柱产业, 差不多每个国家都给予了高度重视. 在当前由于生产高度自动化, 使得生产率空前提高, 同时全球市场狭窄, 使得竞争尤为激烈. 在这新的情况下, 更需按需求(市场)来调节生产. 这样也导致产品生命周期日愈缩短, 生产朝多品种, 中小批量生产方向发展. 面对这新的形势, 为了在激烈竞争中处于有利地位, 还必需以小的投入获得高的产出. 这样需要将投入、生产、销售联合成一个整体, 从生产的全过程来考虑, 使整体达到高效益. 目前许多人认为, 这样需要一种新的理论来指导生产. 由于销售, 投入乃至生产均带有许多随机不确定的因素, 因此, 随机生产的最优化与控制普遍受到重视. 在这情况下, 在控制论中, 制造系统理论的研究是一个很活跃的领域. 在重要国际会议如 IFAC 大会, IEEE CDC 等会议上均占有重要地位.

### 2 随机生产线的最优设计与最优控制

对于随机生产线的研究, 大致有如下三种方法: 排队论, 随机 Petri 网, 极大代数上随机线性系统.

#### 1) 排队论方法.

若将工件在机器上加工看作是顾客在服务台上服务, 这样生产线是个排队网络, 如果存贮器容量无限大, 且加工时间具有负指数分布, 则可通过马尔柯夫过程来研究, 在排队论中已研究比较成熟, 可得其解析解. 但问题在于存贮器容量常是有限的, 而加工时间一般也不具有负指数分布, 在此情况下, 经典排队论不适用, 解析解难以求得. 现常将其看作是一个广义半马尔柯夫过程来处理, 对其引进标准时钟, 采用模拟仿真方法来进行研究. 美国哈佛大学 Y. C. Ho 教授基于仿真方法, 提出了扰动分析 (PA) 方法, 计算灵敏度, 从而实现参数寻优.

#### 2) 随机 Petri 网方法

为了对生产线特别是对 FMS 进行建模, 引进了各种高级 Petri 网, 包括时序 Petri 网. 如果时间是随机变量, 则为随机 Petri 网, 现多用在系统的建模、描述与仿真方面. 由于逻辑因素, 时间因素和随机因素综合在一起, 从理论上研究随机 Petri 网是困难的.

#### 3) 极大代数方法.

G. Cohen 等人<sup>[1]</sup>首先利用极大代数方法来研究 FMS 问题, 给出了  $m$  个工件在  $n$  台机器上加工的极大代数上线性静态数学模型. 对于批量生产, 进一步给出了极大代数上线性动态状态方程, 文献 [2] 针对串行生产线以及由装配、折散和反馈等连接所组成的一般形式生产线, 给出了如下形式的极大代数上线性状态方程模型

$$\begin{aligned} x[k+1] &= A[k+1]x[k] \oplus B[k+1]u[k], \\ y[k] &= Cx[k]. \end{aligned} \quad (*)$$

\* 国家“863”高技术计划和国家自然科学基金资助课题.

其中  $A[k+1]$  为由加工时间所组成的矩阵, 针对不同生产线,  $A[k+1]$  具体形式已给出, 若加工时间是随机变量, 则 (\*) 为随机生产线的模型. 这模型的优点在于以工件次第第  $k$  为自变量, 不管加工时间是否遵从负指数分布, 不管存贮器容量是否为无限大, 皆模型均为一马尔柯夫过程, 即将以时间  $t$  为自变量的非马氏过程转为马氏过程来处理, 这更方便来研究随机生产线, 基于这模型, 对随机生产线的稳态性质, 状态反馈, 优化设计与优化控制进行了初步探讨, 得到了一些良好结果<sup>[2]</sup>.

关于随机生产线的研究仅刚开始, 稳态性质有待进一步深入研究, 优化设计和优化控制尚处在初级或萌芽状态.

### 3 拉动生产

过去大多数是按计划采取推动 (Push) 方式进行生产, 现逐渐按市场需求进行生产, 基于此的准时性生产 (JIT) 日益受到人们重视, 这导致拉动 (pull) 生产方式产生, 七十年代丰田提出的看板 (kanban) 系统 (如图 1 所示), 就是这方面的一个代表.

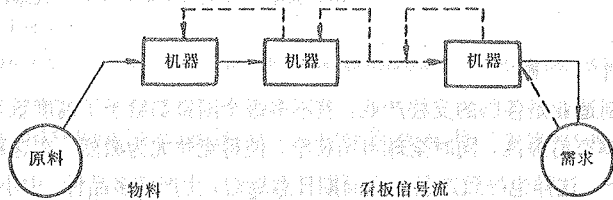


图 1 看板系统示意图

七十年代至八十年代初, 从不同角度和层次对看板系统进行了介绍和描述 (Y. Sugimori 等, 1977 和 M. Yasuhiro, 1981), 随后, 八十年代给出了拉动生产的数学模型, 对确定性拉动生产系统进行了分析. 自八十年代中后期, 开始对随机拉动生产系统进行了研究. J. A. Buzacott (1988) 研究了随机过程对拉动生产系统性能指标的影响. J. L. Deleursngder 等 (1989) 利用离散时间马尔柯夫过程研究了需求变化的  $n$  级串行随机生产线的拉动系统. 特别 D. Mitra 等 (1990, 1991) 对串行随机生产线的看板系统, 给出了其数学模型, 对系统进行了分析, 并讨论了随机的需求情况, 汪定伟博士论文 (1993, 东北大学) 研究了推动/拉动混合策略, 利用马尔柯夫过程模型对这混合控制策略进行了优化.

从目前来看随机拉动生产问题也仅是近几年才提出的, 今后关键的问题还是在于寻找合适的数学模型, 以利子研究生产线的稳态性质, Robust 性, 生产率, 最优库存 (看板数), 最优控制, 最优设计等重要问题, 预计这方面将会有较大发展.

### 4 具有不可靠机器的制造系统

具有不可靠机器的制造系统是在随机生产系统中研究比较热门的论题. Olsder 和 Suri (1980) 最先研究了具有不可靠机器制造系统的生产控制问题, 提出了一个随机模型, 将最优控制化为 Hamilton-Bellman 方程求解问题, 接着 Kimenla 和 Gershwin 在文 [3] 中提出了一个分层控制方案: 上层是具有随机因素的物料流, 目的是根据需求来确定生产率, 底层是如何实现高层给出的生产率的要求. 这样使问题复杂程度大大降低, 在上层给出了 Flow Rate Mode (FRM) 模型. 如图 2 所示.



图 2 FRM 模型示意图

图中  $u(t)$  为生产率,  $d$  为需求率,  $u(t) \in [0, v]$ ,  $v$  为最大生产率, FRM 模型如下:

$$\dot{x}(t) = u(t) - d, \quad 0 \leq u(t) \leq v, \quad d(t),$$

其中 
$$a(t) = \begin{cases} 1, & \text{当机器 } M \text{ 完好时,} \\ 0, & \text{当机器损坏时.} \end{cases}$$

设完好时间为随机变量  $\xi$ , 损坏时间为随机变量  $\eta$ , 假定  $0 < E\xi < +\infty, 0 < E\eta < +\infty$ . 目标函数为

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} E \int_0^T [C^+ x^+(t) + C^- x^-(t)] dt.$$

其中  $x^+(t) = \max(x(t), 0)$ ,  $x^-(t) = \max(-x(t), 0)$ ,  $C^+, C^-$  分别为加权系数, 其提出的 HP (hedging point) 控制策略为如下形式:

$$\text{若 } a(t) = 1, \text{ 则 } u(t) = \begin{cases} u, & x(t) < h, \\ d, & x(t) = h, \\ 0, & x(t) > h. \end{cases}$$

此处  $h$  称为阈值, 文 [3] 的工作为具有不可靠机器的制造系统的研究奠定了基础, 尔后, Akella 和 Kumar, 给出了最优参数  $h^*$  的解析解, 并且在  $\xi, \eta$  都是具有负指数情况下, 证明了 HP 控制为最优控制. 后来这一研究推广到了多台机器情况, Ryzin 和 Lou (1990) 对两台, 三台机器情形提出了 TBC (two-boundary-control) 控制策略, Yan 和 Lou (1990) 提出了 SC (surplus control) 策略等等. 文献 [2] 对一般随机过程和一台至三台机器情形, 利用 Y. C. Ho 提出的扰动分析方法, 给出了参数寻优方法, 并提出了预防阈值控制 (PHP), 经研究表明, 若  $\xi, \eta$  皆为负指数分布时, 则 PHP 即为 HP, 若  $\xi, \eta$  为常值时, 则 PHP 为最优控制, 若  $\xi, \eta$  为一般分布时, PHP 优于 PH.

在应用方面, Gershwin 等 (1985) 将 HP 策略应用于自动化印刷电路插件装配系统, Lou 和 Kayer (1989) 将 TBC 策略应用于大规模集成电路生产中, 均取得了良好的效果.

对于具有不可靠机器的制造系统, 尚有许多领域有待去开发或进一步去深入研究. 例如对于具有多种工件的生产系统, 具有反馈式生产系统以及具有可维修生产系统尚无很深入结果. 对于目标函数, 现在有人在考虑更一般形式. 总之, 这方面将仍是人们很关注的一个领域.

## 5 随机调度

调度 (scheduling) 是制造系统中一个重要问题, 早在五、六十年代就被许多人研究过, 时至今日, 由于生产朝多品种, 中小批量生产方向发展, 这一问题又引起人们更大热情, 特别是为了按需生产, 又提出了许多的有关交付期的新问题, 吸引人们去研究, 当机器加工多种工件时, 若加工的工件是随机到达, 加工时间是随机变量时, 此时调度为随机调度. 随机调度早在六十年代就为人们所研究, 那时多与排队论的研究相结合在一块, 现多与 DESS 理论相结合在一起进行研究. 这方面的理论很不成熟, 通常最适用的方法仍是模拟仿真, 但这方面的理论研究是为人们所关心的, 人们正期待着未来在理论上有所突破.

## 6 随机最优方法

在制造系统中大多数随机最优问题无解析解, 需采用随机逼近方法来近似寻优, 最常见的是蒙特卡罗方法, 由于其通用性受到广泛注意, 但由于计算量大, 对一些稍为复杂, 规模稍大的问题, 即使使用高速计算机, 也难以实现. 为此, 必需研究精度高逼近快, 而计算量又小的随机寻优方法. 在蒙特卡罗方法仿真方面为了提高精度, 在采样方面的改进, 最主要是降低方差方法, 即使估计量的方差尽量减小, 从而使估计精度提高, 进而减小计算量, 降低方差方法主要有: 共同随机变数法 (common random number), 对称法 (antithetic variates) 和控制变量法 (control variable) 等. 作为寻优方面, 通常采用的梯度法, 由于计算对象往往是很复杂的, 其目标函数不可能有明确表达式, 从而不可能通过解析表达式计算其梯度, Y. C. Ho 在仿真基础上, 提出了扰动分析 (PA) 法, 即对一次采样标准状态轨道, 通过扰动传播规律, 求得相对参数扰动的扰动状态轨道, 比较这两轨道, 即可求得性能函数相对于参数的灵敏度 (梯度), 从而使计算量减少, 在 [2] 某些文中, 对一类 DESS 给出了一次采样性能函数关于参数的局部表达式, 从而通过这局部表达式直接计算灵敏度, 而不必通过扰动传播的计算. 以上是对梯度计算的改进, 事实上有许多系统, 目标函数关于参数的灵敏度并不光滑连续存在, 此时采用拟随机梯度法来寻优, 即用拟梯度来代替梯度作迭代计算.

对于参数是离散形式的随机最优问题, 最近 Y. C. Ho 又提出了一种 Ordinal Optimization (序贯最优) 方法, 如果与并行算法相结合, Y. C. Ho 认为是极有前途算法, 将会大大改观寻优算法面貌. 从目前来看, 这一方法尚处在提出阶段, 有关其理论基础尚待建立和探讨.

由于寻优问题的重要性, 广泛的随机寻优方法在不断地引入制造系统中, 例如遗传算法 (genetic algorithms) 以及模拟退火算法等等.

从实用观点来看, 无论是优化设计还是优化控制与决策, 都离不开优化计算, 所以探讨快速有效的



随机最优算法是当务之急,是很有前途的。

现在控制论已由单个装置(机器)的控制发展到对整个生产线,车间乃至整个厂(包括经营)的控制,其中包括了管理,这既有底层控制也有上层管理、决策与控制,这既有单个对象控制也包含着全局整体的综合控制与管理。所面临的是一个复杂对象,其中包含许多不确定性的东西,这将导致随机生产控制以及智能控制的兴起,无疑将会促进控制论进入一个新的天地。上面所提到的几个侧面虽然是针对制造系统,但对于连续过程生产也将是有参考价值的。

### 参 考 文 献

- [1] Cohen, G. et al. A Linear-System-Theoretic View of Discrete-Event Process and Its Use for Performance Evaluation in Manufacturing. IEEE Trans. Automat. Contr., 1985, AC-30, 210—220
- [2] 南开大学 CIMS 课题组. 离散事件动态系统与调度理论论文集(I)(II). 南开大学计算机与系统科学系, 1990, 1992
- [3] Kimentla, J. G. and Gershwin, J. B.. An Algorithm for the Computer Control of Production in the Flexible Manufacturing System. IIE Trans. 1983, 15(4):353—362

## 基于客户/服务器模型的 CIMS 集成软件平台的研究

金尊和 吴澄

(清华大学自动化系, 国家 CIMS 工程研究中心·北京, 100084)

### 1 CIMS 与集成软件平台

#### 1.1 CIMS 软件危机

CIMS 集成不仅是各种自动化设备的物理集成,更是管理、设计和生产等各子系统的信息集成。信息集成的实现主要是通过计算机系统软件。随着计算机硬件的飞速发展和 CIMS 实践的深入,人们发现软件在 CIMS 系统总投资中所占的比例呈上升趋势,达到 50%左右,然而可靠性低,软件的扩展能力差,难以维护,对于生产环境中的很小改变,有可能引起编码的大修改。一般的软件系统针对特定的软、硬件环境而写,在设计新系统时,难以“照搬照抄”。所有这些问题限制了工厂自动化的普及、推广应用。

由以上的分析不难看出,工厂自动化的软件设计成了瓶颈,迫切需要相应的使能(Enabling)支持工具,提高软件的生产率和可靠性,降低投资,缩短开发和调试周期。用户希望这种软件应当:能提供与工厂中各种软件、设备和控制器的连接能力;具有模块化的柔性结构和可移植性,提供需要的软件构件,易于重新组合和扩展,修改时对原系统影响很小,甚至不影响;提供系统集成能力,易于全企业范围内的各子系统的协作。为适应这种需要,集成软件平台应运而生。

#### 1.2 集成软件平台的概念

由于对工厂自动化的体系结构有不同的方案,开发的历史也各不相同,而且现在还不断发展完善之中,因而引起集成软件平台的概念上的差异, Franco Deregibus 等人给出的定义代表了比较流行的观点:

集成软件平台是由基本系统(操作系统,数据库,网络等)支持的软件层面(Layer),同时提供一些通用的服务,并通过这种方式拓展基本软件系统本身。如图 1 所示。

一般的平台由两个主要的部分组成,即平台的核心和一些功能服务模块。核心主要负责平台的管理。功能服务模块一般有四类,即数据存储和管理,应用间的通讯,区域设备集成,用户界面管理等。

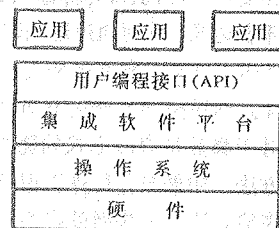


图 1 集成软件平台的概念

### 1. 3 集成软件平台的应用状况

平台产品(如 IBM 的 DAE, DEC 的 BASEstar, Hilco 的 Monitrol 等)的问世及发展,使传统的软件开发方式发生了很大的变化,平台的直接面向应用的服务功能,以及一些系统的 CASE 工具,使得用户从繁重、复杂的编码、调试工作中解脱出来,更多地集中精力于系统的整体化设计。同时,由于平台提供的柔性和系统设计的简化,减小了系统集成的复杂性。而且,使用平台易于实现标准化,便于系统扩展、改变,使得系统的维护难度和费用大为减小。

但到目前为止,几乎所有的平台都是建立在专有的操作系统和硬件平台上,开放性不够,而且这些系统加上硬件投资价格颇高,客观上限制了它的推广。

## 2 基于客户/服务器模型的平台

### 2. 1 客户/服务器(C/S)的概念

C/S 模型的产生是网络技术的进步和计算机应用渗透到社会生活各个领域的结果,它反映了逻辑上独立的自治进程之间的关系,服务器提供服务,而客户则使用服务。在物理位置上,两者可以位于同一台计算机上,也可以通过网络分布到不同的计算机上。它们之间通过消息作为载体完成服务请求和结果应答信息的传递。该结构的特点是:

- 用户透明性

用户不必知道各种服务器的具体位置,就可以随心所欲的使用服务器所管理的资源和提供的各种服务。客户,服务器之间紧密合作,使整个网络如同一台计算机一样。

- 集成能力

既能工作在不同规模的机器上,又能跨越各厂家产品的平台,支持多用户、多任务环境。

- 服务的封闭性

服务器通过信息与外界交互,内部的服务机制对外是透明的。只要消息的接口不变,服务器可以升级,而不影响客户和整个系统的工作。

大型应用软件的实现,传统上为一台主机支持下的集中式的系统,这是大型应用软件的另一个问题。计算机系统以客户/服务器的结构正在许多方面取代主机系统的结构。因此,在应用软件的开发上,将大型应用分解为 C/S 支持下的各种应用,并在网络条件下实现,是一个重要发展方向。

### 2. 2 CIMS 软件环境所需的基本服务器

由前面的讨论可知,C/S 结构的特点为解决平台面临的问题提供了一个有效的方法。我们可以用各种服务器来实现传统方法完成的平台功能,为此,要设计如下几类基本的服务器:

- 数据服务器

这其中又可以分为两类,即文件服务器和数据库服务器。前者只能提供原始的文件控制机制,在这种方式下,每个网点不得不既提供前端服务,又提供后端服务,这对于采用 DOS 操作系统内存限制于 640K 的 PC 来讲,占用内存太大,在很多情况下不能采用。同时,数据的共享还必须经网络传输整个文件才能进行处理,这对 LAN 的带宽要求较高。这种服务器可以用来让多客户共享文件、图表、工程设计等大型数据对象。

数据库服务器则比前者提供了更好的功能,可通过对数据的控制存取来提高并发性,而且数据库服务器对包含所请求数据的记录能作相应处理,客户不再需要额外的工作。例如,一客户要从有 3000 个记录的档案中查出 10 个满足条件的记录,文件服务器的处理是把包含全部 3000 个的数据库文件传给客户,结果 2990 个都没用;而数据库服务器方式下则先作查询处理,然后把其中满足条件的 10 个记录传回客户,这样大大降低了网络负担,加快了响应时间。

许多网络软件产品都提供了文件服务功能,如 TCPIP 上的 FTP,OSI 的 FTAM 等。基于 C/S 的数据库亦有相应的产品,如由电子部 6 所设计的 HiBase 多关系数据库管理系统,它采用标准 SQL 语言作为用户开发接口,并提供了其他的一些实用工具。

### • 车间设备驱动服务器

由于底层设备的多厂家生产,多型号等特点,造成了底层设备通讯协议的多样化,据估计有 600 种之多,而且彼此差别较大.虽然多数厂家提供了通讯软件,但它们分别基于不同的操作系统,并没有提供用户二次开发的工具,这给采用多厂家设备的用户带来集成的巨大障碍.为解决这个问题,有人设想采用一种通用的开发工具来生成设备通讯软件,到目前为止,还没有实现的报道.另一种实际一点的思路是为每个特定型号的设备开发一种设备通讯驱动软件,向上提供面向调度的用户编程接口(API),如开机,关机,执行某个 NC 程序或操作,加工结束,上下传数据,故障报警等.对于每种设备的特殊服务,也提供相应的 API,在特殊需要时使用.在统一的标准下这种服务器可由软件商一次编码,不仅减少重复劳动,而且软件可靠性有保障,用户刚按照需要选择购买相应的服务器.

另外,对于一些还没有自动化的部分,可以采用远程终端向操作员发工作指令,在完成后由终端返回结果.这种电子布告牌的 API 与其他设备的一样,虽然处理方法不同,但对用户来说,是透明的.

### • 应用间通讯服务器

在 CIMS 软件系统中,并发地运行着多个用户进程,这些进程分别隶属于不同的职能部门,完成不同的工作.它们之间需要同步协调和信息交互.这需要平台提供一套应用之间消息传送的机制.这种机制应当对用户是透明的,用户只要把目的进程的标志名和网络位置传给通讯服务器,服务器通过网络把消息传到目的结点的通讯服务器,再由它传给目的进程.消息中包含有源进程的标志名和结点名,以便响应消息以相反的次序返回.

### • 人机界面管理服务器

已有现成的产品,如 X-WINDOW 就是用 C/S 结构设计的.因为它的设计思想是提供机制 (mechanism),而不是策略 (policy),所以接口层次比较低,许多公司在它上面又做了一层,提供了一套工具箱,如 MIT 的 Motif, DEC 的 DecWindow, Sun 的 OpenLook 等.在其他操作系统上也有一些相应的用户界面管理功能软件,如 OS/2 上的 Presentation Manager 等,有的操作系统则把界面功能内嵌入系统中,如 MS-WINDOWS 等.作为基本平台,这些产品提供的功能已经能满足大多数需要.

## 2.3 平台的组织与管理

平台系统不是各种服务器的简单迭加,它不仅要向上提供一个统一风格的用户编程接口,而且,为了充分利用已有的基于 C/S 结构的软件产品,减少开发工作量,增强通用性,应把这些产品作为平台的服务器利用起来,这样还需要一个向下的与服务器的接口.附加地,对不同的产品设计相应的驱动程序,如同字处理软件所用的不同的打印机驱动程序一样.

作为一个完整的平台,还要有对服务器进行协调管理的模块,包括系统组态管理,服务权限管理,系统安全维护,系统起、停、运行调度,系统内服务冲突解决,平台状态监控等.系统整体结构如图 2 示.

以上所述的四类服务器不一定在 CIM 的每个子系统中出现,如设备驱动服务器只出现在 CAM 系统中.同时,一个子系统可能包含多个同类的服务器,如在 MIS 系统中,可能需要多个数据库服务器.应由需要决定取舍,并通过系统的组态功能设置,修改服务器的网络地址和标志符,建立系统的服务器地址簿,以便系统运行时,用户透明的使用.

系统中四类服务器的分布应尽量减少网络的负担,能与应用集中在一个网络中的尽量集中在一个网络中,把网络故障的影响限制在最小的范围内.

## 3 基于 C/S 结构的平台的应用

### 3.1 应用开发

平台提供的基本服务基本上构成了一个良好的分布计算环境,但对开发最终的应用系统来说,粒度

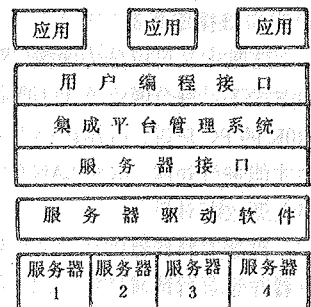


图 2 基于客户/服务器模型的集成平台结构

还小了一些, 可以通过两种方法来把平台的服务往上提高一层, 使该层的服务直接面向应用系统. 其一是在平台上再按照 C/S 结构针对不同领域设计应用服务器, 象顾客一样使用平台的服务, 如历史事件记录服务器就可以使用数据库服务器和设备驱动服务器. 另一种方法是提供一套工具箱, 这种工具箱可以是普通的函数库, 也可以是利用面向对象技术设计的类库体系. 后者比前者具有更大的灵活性. 这部分工作应由软件厂家完成, 用户可以适当修改, 甚至一些技术力量强的用户可以建立自己工具箱.

在运用平台进行应用的设计时, 首先要对平台有全面的了解, 特别是平台提供了哪些服务, 平台的应用的设计方法等等, 然后以工具箱的服务和平台提供的服务为最低粒度进行系统分析、设计, 在平台提供的开发环境或通用的开发环境中完成实现及调试工作. 这个过程是建造期 (Build time). 在完成开发工作后, 就可以在平台上直接运行应用, 这时称为运行期 (Run time). 建造期与运行期构成平台上应用的生命周期.

### 3. 2 基于 C/S 的平台优点

- 开放性

在开放系统标准的引导下, 通过网络互连, 可以把多厂家生产的计算机硬件和操作系统环境集成在一起, 构成对用户透明的分布计算环境. 而且平台结构中的向下接口可以运用原有的基于 C/S 结构的软件资源, 如数据库系统等, 保护用户的投资.

- 可扩展性

不仅系统的服务器可以增加和升级, 而且平台上的应用也可以增加, 不影响系统其他部分的性能.

- 低投资

C/S 的计算环境对系统的硬件要求大为降低, 并且随着 PC 机的性能的逐步提高, 构造以 PC 为基本硬件的 CIMS 系统将成为现实. 这必将大大降低实施 CIMS 的资金投入.

## 4 结 论

集成软件平台是新一代的软件产品, 是运行环境和开发环境的综合. 它的出现, 简化了工作量和开发周期, 提高了软件系统的柔性和可维护性, 为工厂自动化的实现提供了有力的技术支持, 代表了未来工厂自动化软件设计的方向.

基于 C/S 的策略为平台的实现提供了新的方法, 其所具有的系统开放性, 系统扩展能力和低投资等优点, 不仅在平台技术上前进了一步, 而且其潜在的经济优势必将使之成为发展的主流. 目前, 在我国企业资金短缺的情况下, 更具有重要的意义.

## 参 考 文 献

- [1] Franco Deregibus, Maurizio Bobbio, Fulvio Rusina, Open Systems and Manufacturing Software Integration Platforms. Proceeding of 7th CIM-Europe Annual Conference, May 1991, Turin Italy
- [2] 吴澄等. 我国 CIMS 的进展与当前 CIMS 研究应用的新特点. 高技术通讯, 1992, 2(112):12

# 自动控制学科发展的战略——从教学科研谈起

刘永清

(华南理工大学自动化系·广州, 510641)

本文就自动控制学科的发展, 从它的侧面教学科研给出探索.

## 1 自动控制学科面临了一个大转折的新形势

自动控制学科面临了一个大转折的新形势. 对自动控制学科求生存、求发展就必须从战略上来分

析:

外部环境(整体性)决定自动控制的单位、学科、个人的生存;

内部环境(局部性)决定自动控制的单位、学科、个人的发展。

当前自动控制学科面临的国际外部环境:维纳(1947)提出控制论;国际上1960年,贝尔曼、卡尔曼、庞特里雅金为代表的现代控制论;国内,钱学森1954年,钱学森、宋健1980年建立工程控制论;1989年,宋健提出了系统控制论。

宋健在系统控制论一文<sup>[1]</sup>中指出:近十年以来,在高科技及系统控制论及其工程化的当代,一切发达国家和很多发展中国家,人们生产劳动方式和生活方式都发生了巨大的变化,其重要标志是劳动时间不断缩短的情况下,人均社会劳动生产率和人均国民收入都增长了大约10倍,人的平均寿命大大延长。促成这种急剧变化的主要原因是两个相互联系的紧密领域:一是信息技术;二是系统控制论(系统科学)的概念、理论方法的工程化(即系统工程)的应用。

系统控制的理论和方法,为整个生产过程(如计算机集成生产系统CIMS)实现计划、调度、管理、运输、销售和维修服务的优化和高度自动化提供了巨大的可能性,用智能机械编组的全自动化生产系统也已投入运行,在系统控制技术的推动下,把人类生产活动的智能自动化和劳动生产率提高到一个新的前所未有的程度。

当前自动控制学科面临的国内外外部环境是“党的十四大”和“党的14届三中全会”,确定了社会主义市场经济的新经济基础。几十年来在计划经济的经济体制下形成的自动控制学科,如何尽快过渡到适应服务于社会主义市场经济,这是自动控制学科发展面临的一个“大转折”!在这个“大转折”的新形势下,自动控制学科求生存、求发展及其教学科研深化,都面临了更深层次的新挑战与机遇。如包括自动化的科研机构在逐年减少拨款及实行稳住一头开放一片的情况下,稳住一头的自动控制理论与开放一片的自动化技术应用开发都处于经费短缺及“阵痛”阶段。再如高校中自动控制系(所),也面临着经费短缺及培养的自动化学生知识面狭窄、适应性不强的困境。就在这种国内外相同的外部环境下,自动控制学科科研机构、高校中自动化系(所),由于其内部条件的不同,得到了不同的发展。有的兴旺发达,有的处于危机困难重重之中。这种外部内部条件的关键之处在于下述问题。

## 2 把计划经济体制下的“等”字思想观念转化到市场经济体制下竞争的“争”字思想观念上来

把计划经济体制下的“等”、“靠”、“要”的“等”字思想观念转化到市场经济体制下竞争的“争”字思想观念上来。而且思想观念的更新要伴随着整个改革开放的全过程。思想观念早更新,早主动早得益。这样就能把“精神”转化为“物质”。是当前自动控制学科发展、教学科研的深化具有战略意义。现从以下几个方面对比说明。

在大学招生上,国内统一计划招生,统一考试、统一录取分数线。进校严,淘汰率低,毕业易;国外入高校易,淘汰率很高,高校毕业出去严。而西方国家读大学的学生,部分竞争到奖学金外,靠自己解决读大学的费用意识浓,依靠父母的费用读大学者感到不光彩。在大学期间生活上自立能力强;并培养了适应社会竞争能力。国内大学生入学时,全国各地高校中充满了父母送子女读书场面。大学期间费用由父母供给看成是天经地义常事。国内大学生自立能力弱,适应社会竞争的意识淡薄。

国内在教学内容上,统一专业,统一课本,统一教学大纲和时数。部分教师讲的太细的传统演绎法,削弱了培养学生独立思考及能力。而西方国家讲课注重独立学习能力的训练。如著名物理学家扬振宁博士说到他的教师台劳讲课时说:台劳教授经常出入实验室,他经常不按课本上内容讲授,也常常讲错,但他讲授了他在实验室中遇到的物理问题、解决的方法、某些还未解决的问题及其解决到什么程度。他这种通过物理问题、讲解决的思路、讲问题产生的背景和应用、讲观点、讲思考、讲发现过程,深受学生欢迎。

国内在计划经济基础上培养的大学生,在思想意识上往往带有“一靠、二要、三等”的“等”字思想。因此,毕业是计划分配,强调专业对口,人才流动难。而毕业后在科研机构或高校中工作的情况来

看,“等”、“靠”、“要”的思想较浓,竞争的思想意识较弱.因此,这种“等”字思想、“等”字行动与作风,使得在社会主义市场经济的共同的外部环境条件下,“等”、“靠”、“要”思想观念未更新的自动控制单位、学科、个人处境困难与危机.但同时这种外部环境下,某些自动化学科、单位、个人,他们把“等”、“靠”、“要”的思想观念更新到市场经济竞争的“争”字上来,取得了主动,取得了经济效益,使精神变成物质.如天津大学信息与控制研究所所长寇纪松教授、华南理工大学自动化系智能控制仪表研究室主任叶乐年教授、青岛化工学院化工自动化系主任邬齐斌教授等创办的公司及领导的自动化学科的系所敢于把计划经济旧体制下的“等”、“靠”、“要”的思想观念更新转化到市场经济竞争的“争”字思想观念上来,取得了各自的经济效益、社会效益.抓住了挑战与机遇,处于兴旺发达的良好局面.

当然,几十年来在计划经济体制下形成的“等”、“靠”、“要”的“等”字思想与心理上的隋性,要走出“等”字的思想观念误区,也不是一个短时间内能完全更新转化过来的事.但少一点“等、靠、要”的思想,多一点竞争的“争”字思想,也会从量变产生质变.早转变更新,早主动,早得益,就会把精神变成巨大的物质.

### 3 自动控制学科教学科研深化的目标与对策

在计划经济体制下,需要高校人材培养的模式是单一学科为主的,如科学家、教育家或其它,工作要有其特点为:创造性,奉献性.社会主义市场经济体制下,人材培养的模式是复合型人材:既是教育家,又是科学家,还应是管理学家集中于一身.如自动控制学科的人材,既要有自动控制学科的基本专业知识,又要懂市场经济;既要能搞好自动控制学科科技开发,又要做自动控制产品的管理与经销!这要有其特点:适应性、创造性、奉献性.如果把这九个字看成是自动控制学科教学科研深化的目标,从这个侧面来看自动控制学科的发展及实现“九字”目标的对策应有以下五点:

**对策之一:** 培养一批善于思考有开拓能力的复合型人材.在计划经济体制下,我国也培养了一些有才能的控制专家.这正像英国按人口比例计算获得诺贝尔奖的人数是世界第一,但转为实际经济效益的则微乎其微,对国民经济的发展,对人民生活水平的提高影响很小.尤其我国现在实行社会主义市场经济的新体制,急需改变目前高校中自动控制学科专业设置面太狭窄;及有控制没有自动化技术;没有像宋健所指出的“系统控制论”及其工程化,即系统工程与某些管理课;还需改变自动控制学科专业中必修课占90%~95%的设置.对研究生创造条件学习第二专业变成复合型人材.美国一所咨询机构,近期对1311位科学家的论文、成果、晋升等经过5年的跟踪调查,其结论是全部都是靠跨学科综合取得进展的<sup>[2]</sup>.

科研、“攻关”需要独立思考!应用开发也需要独立思考!创新是科学、技术存在与发展的基础.而思考,特别是独立思考是创新的关键.高校中本科生、研究生注重独立思考的培养与训练是出高水平人才的重要内容.

教学中,部分教师把教材内容讲的太仔细,注意了对学生知识的传授,忽略了通过教知识更着重教“思考”的传统的演绎教学法,削弱了对学生独立思考和能力的培养.提倡在大学高年级本科生及研究生中开设“讨论班”式的读著作课.在讨论班课上学生变成了主讲“教师”,听讲教师及学生提问题,让负责讲授的学生解答及其展开讨论.使参加讨论班课的学生在思考中磨炼!这样就可把个别思考过渡到了“整体性的全面思考”!使学生学会“在黑暗中探索走独立思考与创新之路”.

**对策之二:** 把自动控制中的创新项目、优化选题放在突出地位.我们可以从三个方面来展望自动控制学科的进展.一是从过去自动控制学科发展延伸过来的估计未来的发展(如综述论文,国家自然科学基金中自动化学科资助领域及其范围导向);二是从今天外推出来的研究领域及应用开发、“攻关”项目(如“八·五”攻关项目、国家自然科学基金中的“攀登、赶超创新方向”);三是根据科学的预测及富有想像力的“灵感”,来看自动控制学科未来可能出现的新突破(暂且称它为“创新”).

选题对自动控制学科的发展有其重要意义.同时它也是有限的经费、时间、设备、资源分配的依据.优化选题是优先选择自动控制的应用、开发、“攻关”课题、自动控制技术成果转化商品或高技术及产

业的中间试验、与先进的自动化硬件相匹配的软件开发及多学科交叉的新颖自动控制理论课题等。如果把以上的选题称为创新性领域的课题。我们就要盯住这种创新性领域课题。从历史来分析,在旧的研究领域中的那些杰出的带头人,要到新的领域中去当新的研究领域的学术领袖是十分困难的,因为他们已习惯了在旧领域中得以成功的研究方法,而这些研究方法在新的研究领域往往并不适用,这就是我们今天面临的社会主义市场经济大转折的新形势,它为自动控制学科工作者,特别是年轻的自动控制工作者创造了很多机会,为具有大批聪明才智的自动控制研究工作者创造了走向市场经济的难得机遇,及走向自动控制学科领域国际前沿的良好机会,只是跟踪自动控制的传统的旧领域,创新已是非常困难的!那里的自动控制阵地早已有人占领了。要把着重点放在自动控制研究开发的新领域,在创新中求得自动控制的发展。如果仍希望在自动控制学科的传统旧领域中开发研究,那就需要引进新思想、新观点、新方法与新问题,使自动控制的传统旧领域重新焕发青春。

**对策之三:** 自动控制学科的教学科研的结合是学科发展的“良性循环”。高校中自动控制学科中教学水平的提高,依赖于学术水平的提高;学术水平的提高,要靠科研工作的进行。学术水平的提高是一个动态过程,科研工作也应是一个动态过程,还要注意到:“高质量的教学,是在浓厚的科研环境下进行,最佳的教育训练培养是在那些积极从事科研的教师们的指导下才有可能”。因此,高校中教学科研的结合是自动控制学科发展的最佳模式。可是近年来,受到经费短缺与创收的困扰,少数高校从抓科研应用开发走出困境,在教学与科研结合中造成了自动控制学科发展的良性循环。另外部分高校中抓举办劳动密集型的低水平办短训班、大专班创收,又没有把创收中部分收入投入到教学科研,使低水平创收过渡到高水平创收上来;而是将创收“分光,吃光”,造成了教学科研的分离,出现了创收高,科研成果少,学术断层的“恶性循环”。国内,华东理工大学采取了取消系以下教研室、研究室,而相应的设立以学术骨干为主的教学科研融为一体的“教科研组”的模式,是探索教学科研相结合的新做法。

**对策之四:** 建立高校(或科研机构)与企业联合的工业自动化公司实体。这样的实体发挥了高校中具有多种学科与企业联合的叠加优势,克服了自动控制单一学科过份狭窄的弊病。过去学科发展往往只限于某一领域,如本世纪初的物理学,而今天几乎每个自动控制学科的领域中重大科技成果的取得,都是多学科的结合。如商品的制造过程,若干年前想到的设计制造都是从局部着眼进行的,而今天的CIMS包含了从原料设计、加工、装配、分配、决策、销售等整个企业过程的自动化控制。这种“实体”为控制理论的应用提供了途径;同时也为市场经济中、企业中自动控制工程实际问题的解决提供了条件。另外,一些自动化系(所)办的自动化工程公司,与企业联合培养企业技术骨干为对象的研究生等,都是自动控制学科走向适应社会主义市场经济的不同尝试。

**对策之五:** 自动控制学科发展的策略。从整体上来说,应该建立中国自动控制学科发展的目标及其对策。一方面有利于中国自动控制学科跻身于国际自动控制的先进行列;另一方面在国内服务于经济建设、社会发展及社会主义市场经济与提高人民生活水平作出贡献,同时也发展中国自动控制特色的理论方法软件硬件。另外,对过程控制,我们实现局部优化的同时,也应在过程控制中注意整体性的优化及其实现最大经济效益的原则。如在广州及全国某些公司,引进了西方国家先进的DCS集散系统的硬件,但软件工作配合不够,许多功能未能充分利用,以至于先进昂贵的DCS降低为可用的PID调节器或控制仪表。这样对先进的DCS硬件,采用了低水平的控制策略。另外,“八·五”攻关项目仿制DCS及其国产化是否可取?这些是否符合我国自动控制发展的策略!在不同阶段,不同时期发展自动控制的硬件软件、经费投入、较好经济效益的控制理论方法的研究、应用、鼓励更多的年青人进入该学科给出政策、奖励上的导向。

## 参 考 文 献

- [1] 宋健. 系统控制论. 系统工程理论与实践, 1989, 9 (3)

[2] 张启人. 当代新技术. 北京: 人民日报出版社, 1988, 24

## 传统人工智能与控制技术的结合

张 钱

(清华大学计算机系·北京, 100084)

随着控制对象、控制器以及控制任务和目标的复杂化, 传统控制面临许多新问题, 主要有: 1) 计算复杂性的急剧增加, 2) 精确建模的困难越来越大, 3) 输入(传感)信息的多样化和数据量的显著增加, 4) 大量的非确定性因素, 如环境的动态变化、输入信息中的噪声、干扰与误差, 信息的未知性、不完全性等, 5) 多层次、多目标的控制要求. 这些问题对于一个以精确建模和数值计算为基础的传统控制理论和方法是难以解决的. 控制界首先想到需要同其它领域技术结合, 建立一种更有力的理论和方法, 以便解决上面提到的问题. 智能控制就是在这种背景下提出和形成的.

在智能控制的研究和探讨中, 人们想到许多可借鉴的技术, 如神经网络、模糊逻辑、运筹学和人工智能, 并开始了许多有意义的探索.

本文仅从人工智能与控制技术的结合上, 探讨如下问题. 1) 在人工智能与控制的结合中, 控制技术能从人工智能学到和得到什么, 也就是这两者结合的必要性和可能性. 2) 在二者的结合中, 将会出现什么新问题. 3) 这些问题解决的前景如何.

### 1 传统人工智能

首先我们需要对人工智能的发展历史, 做一个简单的总结和评价. 这是我们后面讨论的出发点.

在人工智能短暂的 30 多年发展历史中, 几乎是希望与困难并存. 这里我们不准备对它 30 多年历史的“功过”做全面评述. 只准备简要回答一个问题, 即至今为止, 人工智能最有影响和最重要的成就是什么.

人们将会毫不犹豫地回答: 专家系统 (expert system). 的确, 人工智能利用人类专家的知识, 为各个特定专业领域, 建造了多种多样的专用计算机辅助咨询系统. 这类系统能力高超, 其性能可与人类专家相比, 表现出高度的智能.

不过我们更为关心的是, 在这些成功的专家系统的实践背后, 隐含着哪些人工智能的基本思想、方法与技术. 我们把它们归纳为以下三个方面.

1) 人类的某些深思熟虑的行为 (deliberative behaviors), 如规划、调度、诊断、设计等等, 通常以丰富的知识和经验为背景, 换句话说讲, 知识是这种智慧的源泉. 2) 这些知识和经验, 通常可以用符号表达在计算机中, 人工智能已经找到一些行之有效的知识符号表示方法, 如产生式系统 (production system), 语义网络 (semantic network) 等. 3) 一个基于知识的系统, 可以通过启发式搜索 (heuristic search) 或推理 (reasoning) 找到问题的满意解.

这种以符号逻辑推理为基础的解题方法, 即以符号表示和处理模拟人类深思熟虑智能行为的方法, 是传统人工智能 (classical artificial intelligence 或传统 AI) 的核心. 它不仅对 AI 本身的发展有重要意义, 也是其它领域可借鉴的宝贵财富.

控制技术从传统 AI 中至少可以学到解决复杂难解问题的策略, 学到定性启发式建模的手法. 由于智能系统的高度复杂性, 以数值计算和分析为基础的传统控制难以解决它的计算复杂度, 而人工智能技术中基于知识的方法, 启发式搜索的方法等, 这些解决复杂难解问题的有效方法, 都可为降低控制的复杂性提供帮助.

在人工智能出现前, 我们能为计算机提供的建模手段大体是: 1) 给出问题的一个准确的递归定义, 2) 给出问题的精确数学描述, 或者 3) 给出一个有效的 (多项式) 算法. 可惜, 正如我们所知, 这三种



手段所能描述和表达的问题范围极其有限。人工智能为我们提供另一个更有力的手段。即描述性知识 (declarative knowledge) 的符号表示。

上述手段不仅可用于控制系统的分析、设计,更重要的是可用于控制系统的实现,即构成智能控制系统。

### 2 分层递阶控制

控制界首先提出了把人工智能运用于控制的设想,提出了智能控制的概念<sup>[1]</sup>。一个最直接的办法是,把人工智能系统,如专家系统,加到控制系统的顶层,形成所谓的专家控制 (expert control) 或基于知识的控制 (knowledge-based control) 等。

但把一个人工智能系统与控制系统直接结合起来,却存在着困难。因为前者是以符号表示的推理系统,知识表示的层次很高,信息数量少但已被高度压缩,推理过程很缓慢,工作周期通常以秒或者分钟、甚至小时计。控制系统则相反,它本质上是数值计算系统,知识层次低、数据量大,工作速度快,其周期通常以毫秒计或更快,是一个实时系统。把这两种在知识表示粒度和时间尺度上有巨大差异的系统结合起来,将引起通讯和控制上的种种困难。

为了缓解上述困难,由控制专家提出的解决办法是分层递阶控制 (hierarchical control)<sup>[1,4]</sup>,如 G. N. Saridis 提出的由组织级、协调级与控制级组成的 3 级结构, J. S. Albus 提出的 NASA/NBS 遥控机器人的标准体系结构参考模型 NASREM,则是 6 层结构<sup>[2]</sup>。

多层结构的优点是,不同层次可分别处理不同时间尺度要求的事件。层次多了,层次之间表示粒度的差异就缩小了,因此有利于层间通讯。下层不能处理的问题可以提交上层解决,上层处理的结果可以指导下层的工作。高层知识的引入,可以降低底层数值处理的复杂性,提高系统的智能。符号推理的引入,增加了知识描述的手段,这些均可为传统控制提供有力的帮助。

分层递阶结构的思想目前还只是初步的,缺乏定量的、深刻的分析,系统该划分多少层次,如何划分层次,层次间如何通讯,等等,许多问题仍不很清楚,有待于弄清。但它仍不失为一个值得研究的课题。

### 3 基于传感器的智能

人工智能在其发展的初期,与控制论有着密切的血缘关系,但在符号主义统治时期里,它们分道扬镳了。重新引起与控制界的连系,只是近几年的事,事情是从分层递阶系统结构的争论引起的。

八十年代中,以人工智能专家,MIT 的 R. A. Brooks 教授为首,发起了一系列对分层递阶系统结构的讨伐战<sup>[3,5]</sup>。其主要理由是,在分层递阶系统中,把系统的决策、推理和控制完全集中在系统的最高层(如 Saridis 的组织级),实行统一的指挥和调度,必然形成严重的计算瓶颈 (computational bottleneck),将极大地降低系统的实时性、鲁棒性和灵活性。为此,他提出完全不同的包容体系结构的设想 (subsumption architecture)。这种结构的要点是: 1) 智能系统的行为是由一系列基本的反射行为 (reactive behaviors) 组成的,各个行为是由感知-动作对 (perception-action) 组成, 2) 系统的整个行为不是由中央控制器(如组织级)集中统一调度,而是由各基本行为通过交互和竞争产生的。他把两种体系结构的差异分别用以下两个图(图 1)表示。图 1 (a) 表示按信息处理功能划分,图 1 (b) 是按完成任务行为划分。

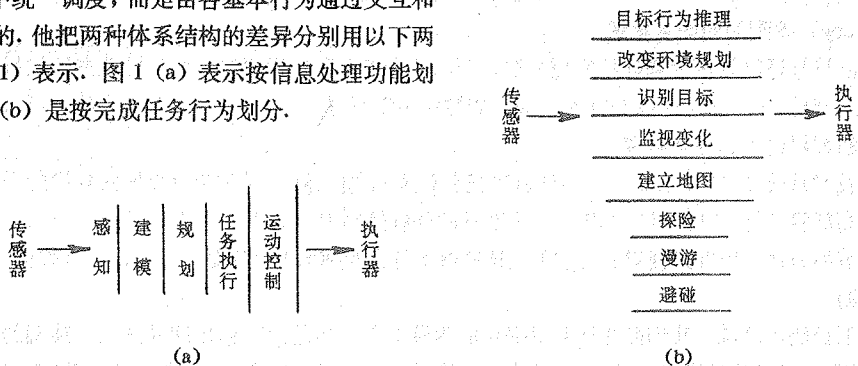


图 1 两种不同的系统结构

Brooks 等人提出的问题,不只是涉及智能系统的体系结构,而是对传统人工智能的挑战.传统人工智能成功地用符号处理描述人类的深思熟虑行为,这种行为在专家系统中得到充分的体现.可是,基于这种原理建立的系统,是一个完全依赖先验知识建立的专用系统,与环境的交互能力很差,系统非常脆弱,对于事先没有预计的事件,对于突发事件,几乎没有处理能力,这种系统很难在变化的环境中生存,是一个与环境现场离脱的系统.为了使智能系统能在动态的、事先不完全知道的环境,即所谓非结构化的环境(unstructured environment)中生存及工作,必须增加它对环境的反射和适应能力.对那些事先未知的环境信息只能依靠在线的传感器测量取得,因此面向传感器、基于传感器的智能,是解决传统 AI 局限性的根本途径.人们把这种新的人工智能的研究方向,称为临场 AI (situated AI),即研究处于动态现场中的智能行为,如适应行为、反射行为和学习行为等,它不同于基于符号处理的传统 AI,它以传感信息处理为核心.

临场 AI 的出现,与智能控制的提出是智能与控制两领域不谋而合的想法,前者是人工智能感到对控制技术的需要,后者则是反映控制对 AI 的需要.人工智能又重新走上与控制结合的道路.

#### 4 多自主体的系统

上面介绍了两种相互对立的系统设计思想—分层递阶与包容体系结构,虽然双方各持己见,互相批评对方的缺陷,不可否认,大家都面临着种种类似的难题,有待于深入研究.

首先我们看一下图 2,一个智能系统大体包含 3 个主要部分.一是思考功能(thinking),二是动作功能(acting),三是感知功能(sensing).传统 AI 虽然研究了从思考到动作之间的联系,它反映了人类有意识的行为.传统控制研究了从感知到动作到环境这个闭环,它反映了人类的某些反射的行为.一个智能的系统需要把这两种行为组合起来,分层递阶系统较充分地考虑了有目的的行为,但实时性不好,包容体系结构,较充分地考虑了反射行为,但很难实现目标引导下的行为.它们都面临着以下共同的问题.

首先,需要不需要环境(外界)模型,要什么样的模型.一般认为,一个自主的智能系统,要实现各种预定目标,产生各种有目的(意识)的行为,需要一定的环境模型.问题是要什么样的模型,在传统的 AI 和控制中,尽管所需要具体模型不同,但有一点是一致的,即需要一个‘完全’的世界模型,这在一个复杂的智能系统中是办不到的.理由很多:知识不完全,环境不确定,无法描述等等.

怎样建立模型,在人工智能和控制中,传统的作法是,依靠完备的先验知识,建立一个完全的模型.如上所述,在智能控制中由于知识的不完备,无法建立完整的模型,需要通过传感器在工作过程中加以补充和修改,即在线辨别和建模.这里也有一系列需要研究的课题.

既然我们不能建立一个完全的世界模型,我们只能建立一个系统行动所需的模型.由于环境的复杂性,我们不能像简单的控制系统那样,通过单一的测量装置获取若干有限的参数.这里我们需要性能各异,分布在不同地点的多种传感器,共同建立所需的模型.因此传感器的选择、布局和传感信息处理方法,成为新的重要的研究课题.多传感器的信息融合技术(multi-sensor fusion)就是研究如何最有效地利用这些传感信息.

传统人工智能主要研究的是,相对静止的结构化环境(structured environment)中的人的深思熟虑的行为.在智能控制中,它的环境是变化的、非结构化的,系统的决策、规划和行动,通常要根据现场情况实时做出,传统 AI 方法不能适应这种要求.我们需要研究一套处理非确定性的方法,一套处理常识知识的方法和有效的学习方法.这些问题虽然都是当前人工智能热门的研究课题,但它们都远没有解决,还需要进一步的工作和研究.

符号处理和以数据为基础的控制之间还有很大的差距.如何把传感器获取的数据,迅速地变换为高层决策、推理所需的符号,这里需要一套有效的方法,目前已有的方法还不能满足要求.如何把高层以符号表示的‘意图’,变成底层可执行的命令,这里通常也需要大量的知识和处理时间.总之,要缩短这

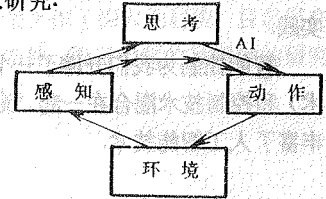


图 2 智能系统的组成

二者的差距，需要大量的知识，需要有效的算法，以及相应的硬件和软件。

一个复杂的智能控制系统，总是由多个独立的子系统组成的分布式系统，如图3。不管整体系统按何种方式组织，按功能划分也好，如分层递阶结构，按行为划分也好，如包容体系结构，但它们往往是一个多自主体的系统 (multi-agent system)，它们都有一个共同的问题，这就是协调 (coordination)。就是说，各子系统如何协调各自的工作以实现总体目标。目前提出的办法大致上分两大类，一是集中协调的方法，一是竞争、制约的方式。通过集中统一的规划和调度实现子系统之间的协调，这是典型的符号主义的方法，分层递阶结构中采用的是这种方法，人工智能中提出的黑板结构 (black-

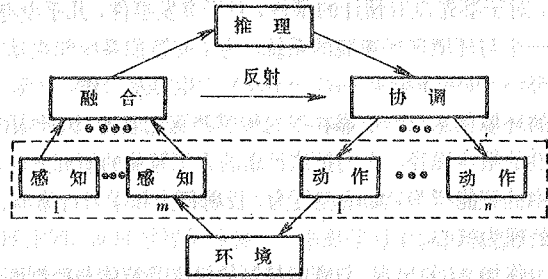


图3 复杂智能控制系统

board)，也是通过全局数据库对子系统进行统一的调度。Brooks等人提出的主张则反对统一调度，他们主张系统的整体行为应该由子系统通过相互的交互、制约和竞争来达到，这是典型的连接主义的主张，它相当于神经网络的连接机制。这两种主张究竟哪一种更好？现在还在争论之中，需要进一步的研究和实践。

智能控制为我们开辟了一个很有前途的研究领域，它不是简单地把人工智能技术（或者其它什么技术）和控制技术混合在一起，而是需要开拓新的研究内容与研究方向，这样既丰富了控制领域，也同时丰富了人工智能技术。

### 参 考 文 献

[1] Albus, J. S., Barbera, A. J. and Nagel, R. N.. Theory and Practice of Hierarchical Control. IEEE Computer Society Int. Conf., 1981, 18—39

[2] Albus, J. S., McCain, H. G. and Lumia, R.. NASA/NBS Standard Reference Model for Telerobot Control System Architecture (NASREM). National Institute for Standards and Technology, Rep. 1987, 1235, Gaithersburg, MD, June 18

[3] Brooks, R. A.. Intelligent without Representation, Workshop on Foundations of AI, MIT, Endicott House, 1987, 24—27

[4] Saridis, G. N.. Intelligent Robot Control. IEEE Trans. Automat. Contr., 1983, AC-28(5):547—557

[5] Brooks, R. A.. Intelligence without Reason. Proc. IJCAI91, 569—595

## 迭代学习控制理论进展与挑战

林 辉 戴冠中

(西北工业大学自动控制系·西安, 710072)

### 1 前 言

让控制器本身具有某种“智能”，使得它在控制过程中能不断地完善自己，以使控制效果越来越好，这种具有“学习”能力的控制器一直是控制工程师们追求的目标。自从 Fu<sup>[1]</sup>在1970年提出这种学习控制的概念后，对学习控制的研究一直很活跃。1973年美国和日本以学习控制和智能控制为题开了专题讨论会<sup>[2]</sup>，七十年代发表了大量有关学习控制和智能控制的文章。1977年 Saridis<sup>[3]</sup>发表了他著名的专著“随机系统的自组织控制”，总结了这些理论成果。在此后的十几年间，学习控制技术随着与其相关的学

科,如:计算机技术、人工智能及神经网络,和它的应用领域,如机器人等等的发展而发展。如今,智能控制已经在控制界中占有相当重要的地位。

智能控制粗略地可分为基于人工智能的和基于数学描述的两大类。前者以专家控制为代表,后者有:神经网络控制器,基于小脑模型的联想记忆学习控制器,迭代学习控制、重复学习控制及自动机等。在基于数学描述的智能控制器中又可分为基于参数的和基于品质的两类。前者需要在线地辨识被控对象的参数,如文献[3]中列举了多种学习算法。后者不需要辨识被控对象的参数,而是根据控制的效果,即“品质”,来修正控制器。虽然有多种智能控制的方法,但应用比较成功的只有专家控制,人工神经网络控制器和迭代学习控制器。

迭代学习控制(iterative learning control)是智能控制中具有严格数学描述的一个分支,它以极为简单的学习算法,在给定的时间区间上实现未知被控对象以任意精度跟踪一给定的期望轨迹这样一个复杂的问题。控制器在运行过程中不需要辨识系统的参数,属于基于品质的自学习控制。它特别适合于具有重复运行的场合。它的研究对诸如机器人那样有着非线性、强耦合、难以建模以及高精度轨迹控制要求的场合有着重要的意义。

自从1984年Arimoto等人提出一种PID型的迭代学习控制算法<sup>[4,5]</sup>以来,大大地推进了迭代学习控制问题的研究。由于它简单易行,其控制器具有学习能力,其性能随控制运行次数的增加越来越好,该方法迅速得到了控制界的极大关注。此后许多学者对此从理论和应用方法上作了深入的研究。目前已在开、闭环学习方法,连续与离散PID学习算法的稳定性与收敛性的充分条件、学习控制的鲁棒性的研究上取得了不少的理论结果,并在诸如机器人控制的应用上取得了很大的成功。

## 2 迭代学习控制原理

设被控对象的动态过程为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f[t, x(t), u(t)], \\ y(t) = g[t, x(t), u(t)]. \end{cases} \quad (1)$$

其中  $x \in R^{n \times 1}$ ,  $y \in R^{m \times 1}$ ,  $u \in R^r \times 1$ ,  $f, g$  为相应维数的向量函数,其结构与参数均未知。要求系统在时间  $t \in [0, T]$  内的输出  $y(t)$  跟踪期望输出  $y_d(t)$ , 假定期望控制  $u_d(t)$  存在,即在给定状态初值  $x(0)$  下  $u_d(t)$  是(1)式当  $y(t) = y_d(t)$  的解存在。则迭代学习控制的目标是通过多次重复的运行,在一定的学习律下使  $u(t) \rightarrow u_d(t)$ ,  $y(t) \rightarrow y_d(t)$ 。在第  $k$  次运行时(1)式表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_k(t) = f[t, x_k(t), u_k(t)], \\ y_k(t) = g[t, x_k(t), u_k(t)]. \end{cases}$$

输出误差为

$$e_k(t) = y_d(t) - y_k(t).$$

其中下标  $k$  表示第  $k$  次运行时的值。

设每次运行时的期望输出  $y_d(t)$  不变。迭代学习控制分为开环学习和闭环学习。开环PID学习控制的方法是,第  $k+1$  次的控制等于第  $k$  次控制再加上第  $k$  次输出误差的PID校正项,即:

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \Gamma_p e_k(t) + \Gamma_I \int_0^t e_k(s) ds + \Gamma_D \frac{de_k(t)}{dt}. \quad (2)$$

其中  $\Gamma_p, \Gamma_I, \Gamma_D$  分别为PID学习增益。

开环PID学习控制的基本结构如图1所示。

更一般的开环学习律可以写成

$$u_{k+1}(t) = L[u_k(t), e_k(t)]. \quad (3)$$

这里  $L$  是线性或非线性算子。

闭环PID学习策略是取第  $k+1$  次运行的误差作为学习的修正项,即:

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \Gamma_p e_{k+1}(t) + \Gamma_I \int_0^t e_{k+1}(s) ds + \Gamma_D \frac{de_{k+1}(t)}{dt}. \quad (4)$$

闭环 PID 学习控制的基本结构如图 2 所示.

同样可以有更一般的闭环学习律.

$$u_{k+1}(k) = L[u_k(l), e_{k+1}(l)] \quad (5)$$

当系统为离散过程时, (1) 式为:

$$\begin{cases} x(l+1) = f(l, x(l), u(l)), \\ y(l) = g(l, x(l), u(l)). \end{cases}$$

同样, 在第  $k$  次运行时可表示为:

$$\begin{cases} x(l+1, k) = f(l, x(l, k), u(l, k)), \\ y(l, k) = g(l, x(l, k), u(l, k)). \end{cases}$$

输出误差为:

$$e(l, k) = y_d(l) - y(l, k).$$

相应的开环和闭环 PID 学习律为

$$u(l, k+1) = u(l, k) + \Gamma_p e(l+1, k) + \Gamma_i \sum_{j=0}^{l+1} e(j, k) + \Gamma_d (e(l+1, k) - e(l, k)),$$

$$u(l, k+1) = u(l, k) + \Gamma_p e(l, k+1) + \Gamma_i \sum_{j=0}^l e(j, k+1) + \Gamma_d (e(l, k+1) - e(l-1, k+1)).$$

同样也有开、闭环一般的学习律形式

$$u(l, k+1) = L[u(l, k), e(l, k)], \quad (6)$$

$$u(l, k+1) = L[u(l, k), e(l, k+1)], \quad (7)$$

这里  $L$  是线性或非线性算子.

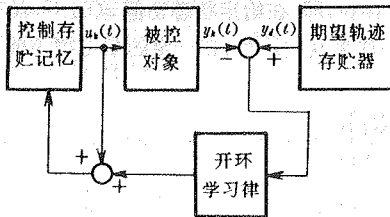


图 1 开环 PID 学习控制的基本结构

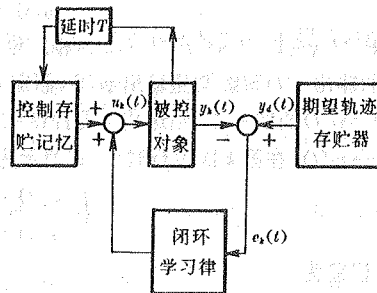


图 2 闭环 PID 迭代学习控制基本结构

### 3 迭代学习控制理论新进展

迭代学习控制研究的内容包括学习算法的稳定性与收敛性, 学习速度、学习律及学习系统结构形式的研究, 学习控制过程的鲁棒性、迭代学习控制的分析方法、初值问题、重复学习控制及迭代学习控制的应用方法. 在近十几年, 尤其是最近几年的研究中取得了许多重要的进展.

#### 3.1 学习稳定性与收敛性

学习算法的稳定性是保证学习控制能够运行的基本前提, 它保证随着学习次数的增加, 控制系统不发散. 但对于学习控制系统而言仅仅稳定是没有实际意义的, 只有使学习过程收敛到真值, 才能保证得到的控制为某种意义上最优的控制. 学习稳定性与收敛性问题是研究当学习律与被控系统满足什么条件时迭代学习控制过程是稳定或收敛的. Arimoto 在最初提出 PID 型学习控制时<sup>[4,5]</sup>就已经对线性系统在 D 型学习律下的稳定与收敛条件作了证明. 后来的许多学者将它逐步发展到其它类型的学习律与非线性系统上. 其中最杰出的是 Hauser<sup>[6]</sup>, 他将系统推广到较为一般的非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), t) + B(x(t), t)u(t), \\ y(t) = g(x(t), t). \end{cases}$$

得出了 D 型学习律下的收敛充分条件. 目前已将系统推广到更为一般性的非线性系统<sup>[7]</sup>

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t)$$

得出了在开、闭环迭代学习下, 用 P 型, D 型及 PID 混合型学习律时收敛充分条件, 且首次给出了迭代学习控制的必要条件. 分析表明, 在满足一定的条件下<sup>[7]</sup>, 迭代学习控制的收敛性与状态方程的具体形式无关.

### 3. 2 初始状态问题

目前的迭代学习控制均假定被控系统每次运行时的初始状态在期望轨迹上, 如果不在期望轨迹上, 但在期望轨迹的某一很小邻域上, 则把这类问题归结为学习控制的鲁棒性问题研究, Heinzinger<sup>[8]</sup>曾专门对初值偏差问题与学习的稳定性作了研究且给出了学习稳定的结论, 但不能保证收敛. Arimoto<sup>[9]</sup>进一步给出了当初始状态偏差不大时, 学习控制收敛于期望轨迹某一邻域, 但也不能保证收敛到真值, 且当初始状态的偏差较大时, 学习过程也会有较大的误差, 因而使控制不能跟踪期望轨迹.

文献 [10] 将迭代学习初始状态问题的研究又向前推进了一步, 指出当初始状态不在期望轨迹上, 但趋于某一确定点时, 开、闭环 PID 迭代学习控制仍能保证学习过程是收敛的, 并给出了详细的证明.

### 3. 3 学习速度问题

对于迭代学习控制一个重要的研究问题就是如何使学习控制过程更快地收敛于期望值, 对此, 不少学者作了多方努力, Gu<sup>[11]</sup>提出一种多步误差组合的学习率, 仿真结果表明收敛过程加速了, 但没有学习律增益的选择方法, 而是一种经验的方法, 不能适用于一般的被控对象. Togai<sup>[12]</sup>给出了学习优化方法, 如梯度法, 牛顿-拉夫逊法和高斯法, 但这需要在已知动态过程精确的结构与参数时才有最优可言, 这就已经失去了用迭代学习控制的意义了. 更多的学者是在学习律上研究, 以期得到最快的学习收敛速度. 人们通过精心选择学习增益且从理论上也保证满足收敛性条件, 但实际仿真中却看到发散的倾向, 以至使人怀疑迭代学习控制的可行性. 文献 [13] 从理论上分析了影响迭代学习控制学习速度的各种因素, 并以开环 P 型学习律为例作了详细的推导, 给出了理论结果.

### 3. 4 学习控制鲁棒性

迭代学习控制鲁棒性问题最早由 Arimoto<sup>[14]</sup>提出, 且在后来的文章中作了深入的讨论, 这些讨论基本上以线性化为前提. 文献 [15] 引进了遗忘因子, 但对动态方程仍然加了不少约束, 且只针对机器人的动态方程进行讨论. 文献 [16] 将鲁棒性问题的讨论推广到一般非线性状态方程, 以 P 型学习律为例, 给出了鲁棒性分析的理论结果. 其表明迭代学习控制具有很好的鲁棒性.

### 3. 5 重复学习控制

重复学习控制简称重复控制 (Repetitive Control) 为迭代学习控制的一种特殊形式, Inoue<sup>[17]</sup>在 1981 年提出这种学习概念. 与常规的迭代学习控制不同的是它要求系统的期望轨迹是周期信号, 当被控系统为线性系统时, 控制器可以由时间  $t_0$  开始直至无穷的时间轴上连续地学习. 近年来重复学习控制发展十分迅速, 有大量文献报导. Hikita<sup>[18]</sup>提出了模型跟踪式的重复学习控制方案, Suyama<sup>[19]</sup>提出了多周期信号下的重复学习控制的设计方法, Watanabe<sup>[20]</sup>提出具有时延系统的重复学习控制方法, 文献 [7] 将 D 型学习律与时域分析法引进重复学习控制, 这些理论成果大大地推进了重复控制的应用.

## 4 迭代学习控制理论的挑战

迭代学习控制虽然在理论上已取得了很大的进展, 且在诸如机器人轨迹控制上取得成功的应用. 但由于迭代学习控制用于未知结构与参数的非线性系统, 将被控对象当作“黑箱”, 要使迭代学习控制适用这样复杂的控制对象, 且要达到实用化阶段, 还有很多理论问题要解决.

### 4. 1 学习律

迭代学习控制的学习律从理论上说可以是如 [3, 5, 6, 7] 式所示的表达式, 但至今为止研究的仅

仅是PID学习律.学习律中在学习次数方向只用到一次运行的信息,如何利用迭代次数和时间轴这两个方向的多次信息以及选择什么样的学习律比PID学习律更加优越以及如何选用变增益学习方法等问题尚待研究.

#### 4.2 学习控制系统结构

目前迭代学习控制系统结构出现了开环学习和闭环学习结构,在某些情况下表明闭环学习具有比开环学习快得多的学习速度<sup>[21,22]</sup>,当然还可以有多种混合学习结构,对于不同的系统究竟应采用什么样的学习控制结构,目前尚不得而知.

#### 4.3 学习稳定性收敛性

学习稳定性与收敛性充分必要条件在理论上已经有了严格的证明<sup>[1]</sup>,但条件与动态过程的参数有关,当这些参数不知道时,学习算法很难保证这些条件成立.这就和迭代学习控制的应用时假设被控对象的结构与参数未知形成了矛盾,因此必须解决在实际应用中判断学习稳定与修正学习增益的算法.在不需辨识动态参数的情况下,比较有希望的解决方法是在迭代学习控制的外环再加一环,用以监视学习过程的稳定性,调节与选择学习律以保证学习的稳定性.这个方法在迭代学习控制中虽然还没有先例,但已在“专家控制”中有文献报导,可借鉴该方法.

P型学习时当输出方程D为奇异矩阵或用D型学习律时而输出方程中D不为零时的收敛性问题仍未解决.

#### 4.4 对部分已知信息的利用

目前迭代学习控制将被控系统视为“黑箱”,假定结构与参数均未知,而实际上对动态过程的某些特性或参数是已知的或者已知其在一个范围内,如何利用这些部分已知的信息以加速学习过程是个尚待研究的问题.

#### 4.5 学习的归纳

现有的迭代学习控制只能用于某种特定的轨迹跟踪问题.学习的结果是记忆下控制过程 $u(t)$ ,一旦要求改变输出轨迹必须重新学习,因而是属于“死记硬背”式的学习,没有较好的“联想”,“推广”等知识应用能力,也就限制了其应用范围.如果在迭代学习控制上再增加一“总结归纳”层,能抽取学习结果的特征信息将提高系统的智能化程度,比较有希望的方法是采用专家系统或神经网络技术与迭代学习控制相结合.目前这种研究刚刚开始.

#### 4.6 连续学习问题

现有的迭代学习控制方法,每运行一遍控制器只能修正一次,这样,要使一个控制器能进入实用阶段,要学习运行的次数可能很大,有时往往是很困难的.因此需要一种方法,使得控制器在一次运行时能够多次地学习.例如,把整个运行区间划分为几个固定的子区间或者采用滑动窗学习方法,这两个方法所要克服的主要困难是各子区间上的初始状态不在期望轨迹上,且是不固定的,文献[10]虽然解决了初始状态不在期望轨迹上时的学习收敛问题,但要求初始状态趋于某一确定点,对于这种任意的初始状态仍没有解决,因而要实现连续学习问题从理论上可归结为解决不定初始状态下学习的收敛性问题.

#### 4.7 任意轨迹跟踪问题

目前迭代学习控制在学习过程均假定期望运行轨迹不变,当期望轨迹改变时,控制器必须重新学习,这样就无法应用于一般的伺服控制,而只能用于固定轨迹(如机器人)的控制上.如果在学习过程中增加由期望轨迹输出,状态到控制函数的映射,则可望用在一般的伺服与各种复杂的非线性工业过程的控制中,这里关键在于映射函数的形成.这可用神经网络或势函数方法形成,这项研究目前尚是空白.

可以预料,以上几个具有挑战性问题的解决将使迭代学习控制的应用进入一个非常广泛的领域,对控制理论的发展产生重要的影响.

### 5 结束语

迭代学习控制对解决复杂的未知结构与参数的非线性系统的轨迹控制问题具有独特的作用,近十几

年,在理论上有了重大的发展,且在机器人轨迹控制中取得了很大的成功.当然,迭代学习控制应用还可以扩展到输出调节问题.在这种情况下可认为期望轨迹恒为零.也可应用到最优控制问题,这时期望轨迹为目标函数的导数为零.然而迭代学习控制理论目前尚有一些挑战性的问题尚待解决,这些问题的解决将大大地推动智能控制,非线性控制理论的发展,对广泛的应用领域将起着重要的影响.

### 参 考 文 献

- [1] Fu, K. S. . Learning Control System-Review and Outlook. IEEE Trans. Automat. Contr. , 1970, AC-15;210—221
- [2] U. S-Japan Seminar on Learning Control and Intelligent Control, 1973
- [3] Saridis, G. N. . Self-Organizing Control of Stochastic Systems. Marcel Dekker. Inc, 1977
- [4] Arimoto, S. , Kawamura, S. and Miyazaki, F. . Bettering Operation of Dynamic System by Learning; A New Control Theory for Servomechanism and Mechatronics Systems. Proc. 23rd IEEE Conf. Decision and Control. Las Vegas, 1984, NV, 1064—1069
- [5] Arimoto, S. Kawamura, S. , Miyazaki, F. and Tamaki, S. . Learning Control Theory for Dynamical Systems. Proc. 24th Conf. Decision Contr. Ft. Lauderdale, FL, 1985, 3,1375—1380
- [6] Hauser, J. . Learning Control for a Class of Nonlinear Systems. Proc. 26th IEEE Conf. Decision Contr. , Los Angeles, CA, 1987, 12,859—860
- [7] 林辉. 迭代学习控制理论研究. 西北工业大学博士学位论文. 1993
- [8] Heinzinek, G. , Fenwick, D. , Paden, B. and Miyazaki, F. . Stability of Learning Control with Disturbances and Uncertain Initial Conditions. IEEE Trans. on Automat. Contr. , 1992, 37(1),110—114
- [9] Arimoto, S. . Robustness of Learning Control for Robot Manipulators. Proc. of the 1990 IEEE Int. Conf. on Robot. and Automation, Cincinnati, Ohio, 1990, 5,1528—1533
- [10] 林辉,王林,戴冠中. 迭代学习控制中的初始状态问题. 第一届全球华人智能控制与智能自动化大会,北京,1993
- [11] Gu, Y. L. and Loh, N. K. . Learning Control in Robotic Systems. Proc. IEEE Int. Symp. Intelligent Contr. , 1987, 360—364
- [12] Togai, M. and Yamano, O. . Learning Control and Its Optimality, Analysis and Its Application to Controlling Industrial Robots. Proc. 24th IEEE Conf. Decision and Contr. 1985, 248—253
- [13] 王林,林辉,戴冠中. 迭代学习控制的学习速度分析. 第一届全球华人智能控制与智能自动化大会,北京,1993
- [14] Arimoto, S. and Miyazaki, F. . Stability and Robustness of PID Feedback Control for Robot Manipulators of Sensory Capability. Robotics Research, The First Int. Symp. 1984, 783—799
- [15] Arimoto, S. , Naniwa, T. and Suzuki, H. . Robustness of P-type Learning Control with a Forgetting Factor for Robotic Motions. Proc. IEEE, 1990, 2640—2645
- [16] 林辉,齐蓉. 迭代学习控制中的鲁棒性问题. 中国航空学会第五届飞行控制及操纵学术研讨会,1993, 435—440
- [17] Inoue, T. , Nakano, M. , Kubo, T. , Matsumoto, S. and Baba, H. . High Accuracy Control of a Proton Synchrotron Magnet Power Supply. 8th Triennial World congress, Kyoto, Japan, 1981, 3137—3142
- [18] Hikiita, H. and Kyotoku, S. . A Repetitive Control System of a Model Following Type. Proc. 28th Conf. Decision and Contr. , 1989, 757—760
- [19] Sugama, K. , Nobuyama, E. and Kitamori, T. . A Design Method for Repetitive Control System with Multiple Periodic Signal Generators Based Upon the Bezout Equation. Proc. 29th Conf. Dision and Contr. , 1990, 1691—1696
- [20] Watanabe, K. and Yamada, K. . Repetitive Control of Time-Delay Systems. Proc. 29th Conf. Decision and Contr. , 1990, 1685—1690
- [21] 曾南,应行仁. 非线性系统迭代学习算法. 自动化学报,1992, 18(2):168—176
- [22] 林辉,戴冠中. 一类非线性系统的学习控制算法. 西北工业大学学报,1993,11(4):397—402