

文章编号: 1000-8152(2002)01-0009-06

## 系统辨识中的闭环问题

莫建林 王 伟 许晓鸣 张卫东

(上海交通大学自动化系智能控制研究室·上海, 200030)

**摘要:** 综述了一类特殊的辨识问题——闭环辨识问题的研究进展。首先介绍了闭环问题的产生与经典的解决方案, 然后对近年来文献中涌现的几类具有代表性的闭环辨识方法进行了评述与比较, 同时指出了与经典方法间的内在联系, 并介绍了对闭环辨识具有很大应用价值的辨识、控制交互式联合设计这一当前活跃领域的现状, 最后, 对闭环辨识问题值得进一步研究的几个方向提出了作者的观点。

**关键词:** 闭环辨识; 一致无偏估计; 模型不确定性; 交互式联合设计

**文献标识码:** A

## Closed-Loop Problem in System Identification

MO Jianlin, WANG Wei, XU Xiaoming and ZHANG Weidong

(Intelligent Control Research Institute, Department of Automation, Shanghai Jiaotong University · Shanghai, 200030, P. R. China)

**Abstract:** This paper summarizes the advance in the study of a class of special identification problem, i. e., the closed-loop identification problem. First, the background of the problem and corresponding classical solutions are introduced. Then, several representative classes of closed loop identification methods in the papers of recent years are surveyed and compared with each other, in the same time, their relevance with classical ones is pointed out. Also, the present state of the attractive field: iterative combined design of identification and control, which is potential for closed-loop identification application, is introduced. Finally, some proposals for further research are made.

**Key words:** closed-loop identification; consistently unbiased estimation; model uncertainty; iterative combined design

### 1 引言(Introduction)

系统辨识的效果受到几个因素的制约<sup>[1,2]</sup>:待辨识对象的动态特性;所选取的模型结构与相应的参数化方式;采用的辨识方法和准则;系统辨识进行的实验条件。从某种意义上说,实验条件可分开环和闭环两种工况。人们从实践中发现,许多成熟的经典辨识方法,如预报误差法、辅助变量法、相关分析法、频谱分析法等,在开环实验条件下均能获得满意的效果。然而,直接将 these 方法应用于闭环条件下对象的辨识时,将存在较大的估计偏差,甚至会导致对象的不可辨识性<sup>[1-4]</sup>。Söderström 指出<sup>[3]</sup>,由于输出信号的干扰噪声通过反馈环节与输入信号相关,直接采用频谱分析法、辨识结果将是对象传递函数与反馈传递函数倒数间的一个加权平均值;Ljung 的理论分析表明<sup>[2]</sup>,如果采用预报误差法进行开环辨识时,只要对象模型集包含真实对象的动态特性,即使噪声模型不足以描述噪声的真实动态特性,仍可获得对象的一致无偏估计,而将此方法直接用于闭环辨识时,只要噪声模型不能精确描述真实噪声,即使对象模型集包含了真实对象动态特性,得到的将是对象参数的有偏估计;Gustavsson 则举出了反馈环节是比例调节器时,直接采用预报误差法将导致对象不可辨识性的实例<sup>[1]</sup>。然而,在许多情况下,由于系统运

行稳定性的需要(如待辨识对象为不稳定系统或含有积分环节),或出于系统运行安全性、经济性的考虑而不能将反馈环节直接去掉(如造纸、玻璃制造等工业生产过程)时,根据闭环条件下测得的数据对对象进行辨识往往不可避免。对上述问题的解决,存在三种经典的解决方法<sup>[1,3]</sup>:直接法、间接法、联合输入输出法。直接法是利用闭环条件下得到的数据,直接把对象当作在开环环境中进行辨识,但要保证系统的可辨识性及对象参数估计的一致无偏性,采用直接法时必须满足条件:或 1)存在足够的外部激励信号;或 2)控制器的阶数足够高;或 3)控制器在不同的模式间切换;或 4)控制器时变、非线性<sup>[1]</sup>。间接法的思想是先根据闭环系统的输入输出信号用开环辨识方法得到闭环系统的传递函数,再由已知的控制器传递函数推导出对象的辨识模型。联合输入输出法则将闭环系统的输入输出统一看作为白噪声驱动系统产生的输出信号,再视为开环情形进行处理。经典闭环辨识法在许多方面并不尽如人意:直接法虽然简洁,但必须满足较为苛刻的条件;间接法与联合输入输出法实验前要知道反馈控制器的传递函数,并且需要至少三个可检测的信号,此外,闭环系统与开环对象模型间的参数转换导致了繁重的计算工作量。

于是,近年来围绕着可辨识性与系统参数的一致无偏估计这一主题,人们依据不同的指导思想提出了许多有效的闭环辨识方法(见文[5~20]).其中,具有代表意义的几类方法的思想主要基于噪声协方差补偿、自适应模型输出误差校正及开环、闭环问题的相互转换.

## 2 几类典型的闭环辨识方法 (Several typical closed loop identification methods)

### 2.1 闭环辨识中的几个性能评价指标 (Some related performance indexes)

无论是经典的闭环辨识法还是近年来出现的各类新型闭环辨识方法,均有几个客观的性能指标,用以评估辨识效果的优劣,这些指标是:

i) 真实对象与真实噪声的一致性辨识:当模型集(包含对象模型集与噪声模型集)足以描述对象与真实噪声特性时,可获得真实对象与真实噪声的一致无偏估计;

ii) 真实对象的一致性辨识:当对象模型集足以描述真实对象特性,噪声模型却不能正确描述真实噪声特性时,仍能获得对象的一致无偏估计.当噪声包含复杂的动态特性时,这一性质显得极为重要;

iii) 辨识的有效性:即模型估计的方差大小,方差越小,则相同数量的采样数据下,辨识得到的渐近模型越逼近真实对象;

iv) 不稳定对象的辨识:对象为不稳定系统时,仍能获得对象的一致无偏辨识;

v) 闭环系统的内部稳定性:即辨识得到的对象的渐近模型,在反馈控制器的作用下,能保证整个闭环系统的内部稳定性;

vi) 反馈控制器的先验知识:进行辨识实验前,是否需要知道控制器的先验知识.

### 2.2 基于开环转换的闭环辨识方法 (Method based on open loop transformation)

许多成熟的开环辨识方法由于闭环实验条件的存在而变得失效.图1为一闭环系统, $G_0, H_0, C$ 分别表示待辨识对象、白噪声滤波器与控制器. $r_1, r_2, v$ 分别为两个从不同位置引入的外部激励信号与输出加性干扰噪声, $u, y$ 分别为测量到的对象输入、输出信号, $e$ 为白噪声.考虑对应于图1中虚线框内的开环模型:

$$y(t) = G(q^{-1}, \theta)u(t) + H(q^{-1}, \Psi). \quad (2.2.0)$$

直接采用预报误差法<sup>[2]</sup>,即:

$$[\hat{\theta}_N^*, \hat{\Psi}_N^*] = \arg \min_{\theta, \Psi} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varepsilon^2(t, \theta, \Psi).$$

预报误差为:

$$\varepsilon(t, \theta, \Psi) = H(q^{-1}, \Psi)^{-1} [y(t) - C(q^{-1}, \theta)u(t)],$$

其中, $\theta, \Psi$ 分别为对象及噪声模型参数, $q$ 为后移算子, $[\hat{\theta}_N^*, \hat{\Psi}_N^*]$ 表示最优估计参数,当 $N \rightarrow \infty$ 时, $[\hat{\theta}_N^*, \hat{\Psi}_N^*] \rightarrow [\theta^*, \Psi^*]$ .由于反馈环节的存在,输入信号 $u(t)$ 与白噪声 $e(t)$ 相关,上式频域表示的等价形式为<sup>[35]</sup>:

$$[\hat{\theta}^*, \hat{\Psi}^*] = \arg \min_{\theta, \Psi} \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \Phi_e(\omega, \theta, \Psi) d\omega,$$

$$\Phi_e = \frac{|S_0|^2 |G_0 - C(\theta)|^2}{|H(\Psi)|^2} \Phi_r + \frac{|S_0|^2}{|H(\Psi)|^2 |S(\theta)|^2} \Phi_v. \quad (2.2.0)$$

其中,可将外部激励信号统一为 $r = r_2 + Cr_1$ , $\Phi_r, \Phi_v$ 分别表示 $r, v$ 的功率谱. $S$ 为相应的闭环系统灵敏度函数模型: $S = (1 + CG(\theta))^{-1}$ ,式(2.2.0)中,由于灵敏度模型与待辨识对象的模型参数 $\theta$ 相关联,当噪声模型与真实噪声存在偏差时,即使对象模型参数集包含真实参数,将得到对象的有偏估计.而对象处于开环条件时,对任意设定的存在偏差的噪声模型,只要对象参数包含真实参数,由于 $C = 0$ ,总有 $G(\theta^*) = G_0$ .

因此,将闭环辨识问题分解或转换为开环辨识问题,成为一种自然的选择.这类方法,以文[6,9,12,14,21,22]具有代表性.

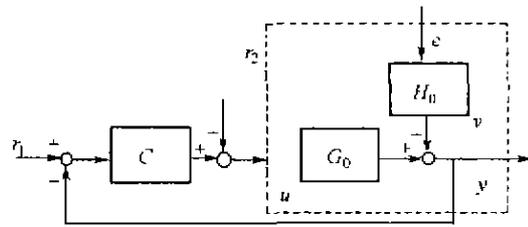


图1 闭环辨识模型

Fig. 1 Model for closed loop identification

#### a) 两阶段闭环辨识法.

Van den Hof等人提出了以灵敏度函数为中介,将闭环辨识问题分解为两个开环辨识问题的两阶段法<sup>[2]</sup>.见图1,闭环系统灵敏度函数为 $S_0 = (1 + CG_0)^{-1}$ .系统输入、输出存在以下关系:

$$y(t) = G_0(q^{-1})u'(t) + S_0(q^{-1})H_0(q^{-1})e(t). \quad (2.2.1)$$

$$u(t) = u'(t) - C(q^{-1})S_0(t)H_0(t)e(t). \quad (2.2.2)$$

其中:

$$u'(t) = S_0(q^{-1})r(t). \quad (2.2.3)$$

第1步 由关系(2.2.2)与(2.2.3)可建立如下模型,辨识从 $r$ 到 $u$ 的灵敏度函数 $S_0$ :

$$u(t) = S(q^{-1}, \beta)r(t) + w_u^*(q^{-1}, \xi^*)e_u(t). \quad (2.2.4)$$

其中, $w_u^*$ 为设定的噪声模型, $\beta, \xi^*$ 为相应的模型参数.因为输入信号 $r(t)$ 与噪声 $e_u(t)$ 不相关,式(2.2.4)转化为输入、输出信号为 $r(t), u(t)$ 的开环辨识问题.Ljung已经证明<sup>[2]</sup>,采用预报误差辨识算法,只要模型集 $S$ 足以描述 $S_0$ 的真实动态特性,即使设定的噪声模型与真实情况存在很大偏差,仍可获得 $S_0$ 的一致无偏估计.实际中,采用较高阶数的有限脉冲响应模型即能满足要求.

第2步 利用第1步的辨识结果 $\hat{S}$ 构造无噪声污染的中间信号 $u'(t) = \hat{S}(q^{-1}, \hat{\beta})r(t)$ 后,同样可构造下述模型以辨识实际对象 $G_0$ :

$$y(t) = G(q^{-1}, \bar{h})a'(t) + w_y^*(q^{-1}, \eta^*)e_s(t). \quad (2.2.5)$$

$\bar{h}, \eta^*$  分别对应于相应的模型参数, 与(2.2.4)一样, 上式是一个典型的开环辨识问题, 可获得真实对象的一致无偏估计. 这样, 闭环辨识问题分解为两个开环辨识问题.

#### b) Youla/Kucera 参数化方法.

Hansen et al 首先将 Youla/Kucera 参数化的思想引入辨识问题中<sup>[6]</sup>, Lee 完整地探讨其在线性系统闭环辨识中的应用<sup>[9]</sup>, Linard et al 则将该方法扩展到非线性的闭环辨识问题中<sup>[21]</sup>. 其中的基本思想是通过引入 Youla/Kucera 参数化公式, 将闭环中的对象模型映射到开环中——对应的参数模型, 从而完成问题的转换. 参考图 1, 由 Youla/Kucera 参数化公式, 使闭环系统内部稳定的对象模型集可以表示为<sup>[9]</sup>:

$$G = (N_x + D_c R)(D_x - N_c R)^{-1}. \quad (2.2.6)$$

其中参考模型  $G_x$  为任一个能使图 1 中的闭环系统内部稳定的对象, 并具有右互质分解形式  $G_x = N_x D_x^{-1}$ , 控制器亦具有右互质分解:  $C = N_c D_c^{-1}$ ,  $R$  为一一对应于  $G$  的任一稳定的传递函数,  $G_0$  对应于  $R_0$ . 再考虑图 1 中信号间的联系, 可导出如下关系式<sup>[23]</sup>:

$$z = R_0 x + T_0 e. \quad (2.2.7)$$

其中,  $z = (D_c + G_x N_c)^{-1}(y - G_x u)$ ,  $x = (D_x + C N_x)^{-1}(u + C y)$ ,  $T_0 = D_c^{-1}(1 + G_0 C)^{-1} H_0$ . 注意到  $u + C y = r_2 + C r_1$ , 显然, 输入信号  $x$  与噪声  $e$  不相关, 输入、输出信号  $x, z$  可由检测到的信号  $u, y$  构造. 所以, 式(2.2.7) 是一个典型的开环辨识问题, 从而根据  $R_0$  与  $G_0$  的一一对应关系(2.2.6) 得到对象的一致无偏估计.

#### c) 互质因子法.

Schrama et al 首先将互质因子的概念应用于闭环辨识中<sup>[12]</sup>, 并由 Van den Hof 加以完善<sup>[14]</sup>. 这种方法的主要思想是将单输入、单输出的闭环系统视为单输入、双输出的开环系统, 再利用互质因子的性质获得对象的一致无偏估计. 图 1 中存在如下关系:

$$y = G_0 S_0 r + S_0 H_0 e, \quad u = S_0 r - C S_0 H_0 e. \quad (2.2.8)$$

上式可视作输入为  $r$ 、输出为  $y, u$  的单输入、双输出开环辨识问题. 定义  $N_0 = G_0 S_0, D_0 = S_0$ , 可得到关系式  $G_0 = N_0 D_0^{-1}$ . 但由于开环辨识得到的  $\hat{N}, \hat{D}$  不能保证  $N_0, D_0$  的公因子的精确对消, 辨识结果  $\hat{G}$  的阶次往往高于实际对象. 为此, 引入稳定滤波器  $F$ , 构造中间信号  $x = Fr$ , 将式(2.2.8) 转化为:

$$y = N_f x + S_0 H_0 e, \quad u = D_f x - C S_0 H_0 e. \quad (2.2.9)$$

其中,  $N_f = G_0 S_0 F^{-1}, D_f = S_0 F^{-1}$ , 使得  $N_f, D_f$  为互质因子. Van den Hof 给出了一种最优滤波器<sup>[15]</sup>:

$$F(q^{-1}) = D_x(q^{-1}) + C(q^{-1})N_x(q^{-1}).$$

其中,  $N_x, D_x$  的选取与 b) 中一致, 使得相应的  $N_f, D_f$  为规范化的互质因子, 从而获得对象的一致无偏估计  $G_f = N_f D_f^{-1}$ .

### 2.3 基于噪声协方差补偿的闭环辨识法(Method based on noise covariance)

实际上人们早已发现, 在二阶统计特性框架内, 许多成

熟的辨识方法应用于闭环辨识时, 产生偏差的原因在于与噪声有关的协方差项的出现<sup>[24]</sup>. 将噪声协方差项进行补偿是否可获得对象的一致估计呢? Söderström et al 首先在这方面进行了尝试<sup>[13]</sup>, 他通过延长时间段, 将间隔较长的输入、输出信号作为辅助变量, 以尽量消除输出噪声对输入信号的影响来减弱噪声协方差项. 但后来的仿真实验发现: 当信噪比下降时, 这种辅助变量的辨识效果迅速恶化<sup>[17]</sup>. 显然, 在算法中考虑到该协方差项的补偿便可获得更佳的辨识效果, 事实上, 真正的困惑正在于如何寻找噪声协方差项. 近年来, 这方面的研究取得了很大进展, Zhang 等人在时域的框架内获得了突破<sup>[16-20]</sup>, 频域领域则以 Schoukens J, Guillaume P 等人的成果具有代表性<sup>[8, 10, 11, 25]</sup>.

#### a) 基于噪声协方差补偿的时域闭环辨识法.

Zhang et al 提出的时域闭环辨识算法 BELS (bias eliminated least squares) (见文[16-20]) 实际上是一种改进的最小二乘法. 当将最小二乘法直接用于闭环辨识时, 得到如下辨识结果<sup>[17]</sup>:

$$\hat{\theta}_{LS}(N) = \theta_0 + \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Psi_i \Psi_i^T \right)^{-1} \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Psi_i \zeta(i) \right) = \theta_0 + \hat{R}_{\Psi\Psi}^{-1}(N) \hat{R}_{\Psi\zeta}^T(N). \quad (2.3.1)$$

其中,  $\theta_0$  为对象的真实参数,  $\Psi_i$  为回归向量,  $\zeta(i)$  为噪声相关项, 考虑采样点趋于无穷时的极限情况:  $R_{\Psi\Psi} = E[\Psi_i \Psi_i^T]$ ,  $R_{\Psi\zeta} = E[\Psi_i \zeta(i)]$ . 显然, 式(2.3.1) 中的第二项引起了辨识偏差, 为此, Zhang 引入了有限采样点的偏差校正方法<sup>[17-20]</sup>:

$$\hat{\theta}_{BELS}(N) = \hat{\theta}_{LS}(N) - \hat{R}_{\Psi\Psi}^{-1}(N) \hat{R}_{\Psi\zeta}(N).$$

根据所选择的前置数据滤波器的零、极点信息, Zhang 建立了求解噪声协方差向量  $\hat{R}_{\Psi\zeta}(N)$  的线性方程组<sup>[17, 19]</sup>; 充分利用反馈控制器的信息, Zhang Y et al 也建立了求解噪声协方差向量的线性方程组<sup>[16, 18]</sup>. 由于基于线性运算的框架, BELS 方法均存在简洁的在线线性递推算法, Zhang 并证明了该算法在闭环条件下的一致收敛性<sup>[17]</sup>.

#### b) 基于噪声协方差补偿的频域闭环辨识法.

Schoukens J, Pintelon R et al 则采用频域的处理方法, 借助于最大似然估计的思想, ‘间接’的解决了噪声协方差补偿的问题<sup>[8, 10, 11]</sup>. ‘间接’是因为这种频域方法, 并不是在辨识算法中直接增加一个偏差补偿项. 通过傅立叶变换将时域中的采样数据映射到频域后, Pintelon R 指出<sup>[11]</sup>, 实际应用中, 这时由噪声引起的频域数据误差在不同的频率点上并不相关, 而且可以用高斯分布的统计特性加以描述, 由此得到噪声误差的似然分布函数, 再采用基于频域分析方法的极大似然估计算法, 从而得到比较精确的辨识结果. Pintelon R 的方法中, 由于考虑到了输入、输出信号与噪声之间的相关性, 辨识准则中也出现了频域形式的噪声协方差项, 但他将该项假定为已知导致了这种方法的局限性. Schoukens J, Guillaume R 等人的研究工作则解决了频域噪声协方差的估计问题<sup>[8, 10]</sup>. Schoukens J 证明, 对少数几个独立重复实验得到的样本协方差矩阵的加权值代替精确的噪声协方差矩阵, 可得到一致无偏的辨识结果; Guillaume P 则指出, 将频域采样数据进行对

数处理(等效于数据的非线性滤波),再采用对数化的最小二乘估计,当噪声的二阶统计特性未知时,可获得对有色噪声与相关噪声的强鲁棒抑制效果.采用频率方法处理辨识问题,在对连续系统辨识.与控制性能设计相关的辨识方面优于时域方法,但其缺点在于,由于只存在批处理算法,且参数非线性问题的存在,实际上是一个非线性估计器,局部最优‘陷阱’往往也会导致辨识算法的失败<sup>[10]</sup>.

#### 2.4 基于输出误差递推校正算法的闭环辨识方法(Method based on error recursive tuning)

得自于模型参考自适应算法的启发, Landau, et al 首先提出了基于模型参考自适应模型系统(MRAS)的输出误差递推辨识算法<sup>[26]</sup>. Dugard L, et al 从确定性系统和随机性系统两个角度论述了该算法下,系统输出的收敛性与参数估计的一致性<sup>[27]</sup>. Ioannou P, Anderson 等人进一步探讨了该算法在系统辨识及状态估计中的应用<sup>[28-29]</sup>. Landau 对基于该算法的各种闭环辨识方法作了综述<sup>[7]</sup>.这类方法的主要思想在于建立与真实闭环系统相对应的并行的参考闭环系统模型,通过比较两平行闭环系统的输出,由预报输出误差自适应地调整参考闭环模型中可调的对象模型参数,以保证预报闭环输出误差的全局渐近稳定性,即最终趋于白色噪声. Landau 给出了这类闭环辨识算法保持全局稳定的严格正实条件<sup>[7]</sup>,遗憾的是,该正实条件涉及到未知对象及控制器的先验知识.

#### 2.5 基于高阶累积量的闭环辨识方法(Method based on high order cumulants)

正如前述所看到的,许多成熟的辨识方法应用于闭环条件时,所产生的较大偏差源于与噪声相关的协方差矩阵.寻求闭环条件下的一致无偏辨识,只要限于二阶矩的统计框架,就必须对噪声相关的协方差加以补偿,而噪声协方差的估计不仅困难,而且会增加繁重的计算.然而,利用高阶累积量( $\geq 3$ )或相应的高阶谱的统计特性,这一问题得以回避.高阶累积量应用于系统辨识首先出现于 Tugnait J, Swami A et al 的文献中<sup>[30-32]</sup>.随后 Tugnait J, Delopoulos 等人提出了基于高阶累积量的各种辨识准则<sup>[33-37]</sup>.然而这些准则主要针对于存在有色或相关噪声的开环辨识问题.应用于闭环辨识问题的除了 Giannakis G B 应变的成果外并不多见<sup>[5]</sup>. Giannakis G B 的方法利用了高阶累积量对具有高斯分布或对称分布特性的一类噪声的强烈抑制特性,使得非高斯信号被这类噪声污染时,可获得较高的信噪比.事实上,闭环辨识问题与存在输入-输出相关干扰噪声的开环辨识问题存在某种内在联系,因此,研究基于高阶累积量的闭环辨识算法,将会是一个有效的途径.

#### 2.6 各种闭环辨识方法的比较(Comparison between different close-loop methods)

从获得对象一致无偏估计的性能指标来看,上述的各种闭环辨识方法均能满足要求,但在检测信号的选取、计算过程的繁简、算法的有效性,以及对对象与控制器先验知识的要求上存在很大区别.两阶段法、互质因子法、Youla/Kucera 法需要三个检测信号,误差补偿法、输出误差校正法及高阶

累积量法只需要两个可测的输入、输出信号. Youla/Kucera 法、输出误差校正法需要控制器的知识,保证输出误差校正算法有效性的严格正实条件还涉及到未知对象的先验知识.时域偏差补偿法与输出误差校正法存在简洁的在线递推算法,频域偏差补偿法的非线性批处理方式以及开环转换法中的参数变换则增加了繁重的计算.偏差补偿方法中的时域法实质上是一种最优的辅助变量设计方法<sup>[16]</sup>,适当的前置滤波器的选取并不容易;相应的频域补偿法计算中会遇到局部最优‘陷阱’问题,但其最大似然估计框架使参数估计误差的协方差矩阵接近于 Cramer-Rao 下界.其中的许多方法仍与传统的一些开环辨识方法或经典的间接辨识方法相联系,往往表现为其经过特殊变化或优化后的一种形式.开环转换法可以统一到经典的间接辨识法中<sup>[4]</sup>,输出误差校正法则可以视为辅助变量为预报器输出或相应滤波数据的特殊的辅助变量法<sup>[7]</sup>.

正如前述中所说的,在闭环条件下进行系统辨识,往往是一种不得已的选择,但是,在某些情况下,闭环辨识具有开环辨识不能比拟的优点, Pintelon R 揭示了加入闭环系统中的过程噪声在很多情况下实质上等效于可增大信噪比的外部激励<sup>[11]</sup>.实际上 Gustavsson 早就指出<sup>[1]</sup>:在输出信号方差大小受到限制时,包含反馈信号输入的闭环辨识比仅有外部激励输入的开环辨识具有更快的收敛性;而在相同的输出方差条件下,嵌入反馈环节能提供更多的输入信号自由度,从而实现了比开环系统优越的最优输入设计.然而,真正引起人们对闭环辨识优点的认识,是逐渐活跃起来的辨识与控制联合设计这一领域.

### 3 辨识与控制的配合(Match between identification and control)

#### 3.1 辨识与控制的结合问题(Joint of identification and control)

辨识与控制的相互配合似乎是一种不言而喻的常识,然而真正认识这一本质及其重要性还是近几年的事. Gevers 认为辨识与控制的配合是控制理论研究中的一个新的挑战<sup>[38]</sup>,实际上,对辨识与控制问题的通盘考虑, Astrom Landau et al 首先在自适应控制方面作了最初的尝试<sup>[39-41]</sup>.它采用在线的系统辨识代替了事先建模,控制器则根据模型参数的更新结果在线调整,从而构成一个闭环回路.已经证明,自适应控制系统在一定条件下确实能达到稳定,但 Rohrs C E 的反例表明<sup>[42]</sup>:即使对于符合渐近稳定条件并且最后确实表现出渐近稳定性的控制系统,也会出现严重的问题.根本原因在于这里辨识与控制的结合是相当表面化的,并未达到实质上的统一<sup>[43]</sup>.自适应控制的基本思想是独立地进行模型参数的辨识和控制器的设计,辨识追求的是对象的可辨识性.算法的收敛性等完全独立于控制的问题,控制器则追求预期的控制指标.实际上,自适应控制对模型不确定性的利用是‘被动的’,设计控制器时没有把模型的不确定性纳入考虑范围,仅仅希望系统发生突变时,辨识器能够及时察觉,以模型参数随之改变的形式反映出来,再相应调整控制器以保

证闭环系统的稳定.鲁棒辨识或者适合控制的辨识等研究,正是辨识与控制的结合在系统辨识理论方面的革新<sup>[43,44]</sup>.各种鲁棒控制器的设计均将建模误差或系统的不确定性作为控制器设计的条件之一,而鲁棒辨识则将系统的不确定性作为辨识条件,将建模误差作为辨识的目的.为配合这一问题的考虑,近年来的美国控制年会(ACC)都有一个“为了控制的辨识”专题讨论.然而鲁棒辨识其本质仍是一种基于开环的辨识方法,它虽然“主动”地将适于控制设计的模型误差作为辨识的目的,但又缺乏基于闭环自适应在线调整的能力.这一问题的完美解决,应该是一种能与现今成熟的鲁棒控制理论框架紧密衔接的辨识机制;辨识过程是递推实现的,辨识结果(标称系统模型及其误差界)可在线得到更新,控制器可根据辨识结果间歇地进行调整,这便是自适应鲁棒控制的思想<sup>[45]</sup>.然而,这方面还有大量的理论问题有待于人们去研究.

### 3.2 闭环框架下的控制与辨识的交互式联合设计(Iterative control and identification design under closed loop frame)

Schram, et al 首先将互质因子闭环辨识方法引入了辨识与控制的交互式设计思想中<sup>[45]</sup>.随后,基于 LQ 控制、基于内模控制(IMC)、基于  $H_\infty$  控制的交互式设计方法相继涌现<sup>[2]</sup>.这些方法均可以归于自适应鲁棒控制系统的框架内.这类方法具有一个统一的设计思想:基于前述中开环转化的闭环辨识方法,将控制系统的鲁棒性能优化问题转换为相应的辨识问题,在线的、间歇性的、交互式的辨识出一个使控制系统鲁棒性能最优的对象模型并相应的设计出一个性能最优的控制器.以  $J(\cdot)$  表示所选择的控制性能评价函数,  $\|\cdot\|$  代表相应的范数,  $\|J(G_0, C)\|$ ,  $\|J(\hat{C}, C)\|$  和  $\|J(G_0, C) - J(\hat{C}, C)\|$  分别对应于真实系统控制性能指标、标称系统的控制性能指标以及控制系统鲁棒性能指标.其中,  $G_0, \hat{C}$  代表真实对象及辨识出的对象标称模型,  $C$  为根据标称模型  $\hat{C}$  设计的控制器.由范数的性质,下列关系成立:

$$\| \|J(\hat{C}, C)\| - \|J(G_0, C) - J(\hat{C}, C)\| \| \leq \|J(G_0, C)\| \leq \|J(\hat{C}, C)\| + \|J(G_0, C) - J(\hat{C}, C)\|.$$

当满足如下条件时,真实系统将获得良好的性能指标:

- i)  $\|J(\hat{C}, C)\|$  的值较小;
- ii)

$$\|J(G_0, C) - J(\hat{C}, C)\| \ll \|J(\hat{C}, C)\|. \quad (3.2.1)$$

基于以上条件,可依据下述步骤交互式地进行最优辨识以及最优控制器的设计:

第 1 步  $i = i + 1$ ;

第 2 步  $\hat{C}_{i+1} = \arg \min_C \|J(G_0, C_i) - \|J(\hat{C}_0, C_i)\|$ ;

第 3 步  $C_{i+1} = \arg \min_C \|J(\hat{C}_{i+1}, \bar{C})\|$ , 转第 1 步;

第 4 步 根据式(3.2.1)对  $[\hat{C}_{i+1}, C_{i+1}]$  进行鲁棒性能检测,式(3.2.1)成立,转第 1 步;否则,作如下调整后,转式(3.2.1):

- i) 适当增加对象模型阶数,获取更精确的辨识模型;
- ii) 适当增加控制器的阶数;
- iii) 重新调整控制性能函数中的权值.

其中,  $\bar{C}, \tilde{C}$  为相应的可行域.以频域的形式, Van den

Hof, et al 证明<sup>[25]</sup>,采用前述中基于开环转化的闭环辨识方法,对于一些常见的控制性能评价函数,上述第 2 步中的鲁棒性能优化问题可转换为相应的辨识问题,从而真正意义上实现了面向控制的辨识.

### 4 结束语(Conclusion)

经过近二十年的独自发展,辨识与控制终于走到了一起,这为闭环辨识的研究方向指明了道路.从当前闭环辨识研究的状况来看,以下几方面值得加以重视或重新审视:

i) 现今的许多闭环辨识研究尚未脱离传统辨识问题的框架,仍以辨识的一致收敛性、参数估计的无偏性等指标作为辨识性能的评估标准,一味地追求精确模型的估计.复杂的模型虽能较精确的描述真实对象,但对控制器的设计带来很大的困难.实用的控制设计需要的往往是简单的降阶模型,研究存在误差界的闭环辨识问题,建立起与控制设计紧密衔接的新的辨识性能评估标准,更具有实际意义;

ii) 自适应鲁棒控制的思想使辨识与控制达到了实质上的统一. Bayard Schama 等人在这方面进行了一些有益的尝试<sup>[23,45,46]</sup>,但在递推辨识、评估性能指标等方面采用了一些特殊的技巧.缺乏系统的、统一的框架.自适应鲁棒控制的研究仍面临着挑战;

iii) 以频域的形式来描述系统的动态特性具有直观、简洁的优点,寻求具有频域递推形式的在线辨识算法,将能更好地显示出辨识与控制问题间的紧密联系;

iv) 应注重快速、简洁的闭环在线辨识算法的研究.辨识问题,同时也是一个优化问题,近年来,各种快速优化算法不断涌现,为快速辨识算法的研究提供了条件.辨识起源于控制,也应服务于控制,我们相信,闭环辨识将在这方面提供广阔的研究领域.

### 参考文献(References)

- [1] Gustavsson I, Ljung L and Soderström T. Identification of processes in closed loop-identifiability and accuracy aspects [J]. *Automatica*, 1977, 13(4): 59 - 75
- [2] Ljung L. *System Identification: Theory for the Users* [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Inc., 1987, 34 - 67
- [3] Söderström T and Stoica P. *System Identification* [M]. Hemel Hempstead, UK: Prentice-Hall, 1989, 13 - 49
- [4] Van den Hof P M J. Closed-loop issues in system identification [A]. Proc. 11th IFAC Symp. System Identification (SYSID '97) [C], IEEE Publish Society, Fukuoka, Japan, 1997, 1547 - 1560
- [5] Giannakis G B. Polyspectral and cyclostationary approaches for identification of closed-loop systems [J]. *IEEE Trans. Automatic Control*, 1995, 40(5): 882 - 885
- [6] Hansen F R and Franklin G F. On a fractional representation approach to closed-loop experiment design [A]. Proc. American Control Conf. [C], IEEE Publish Society, Atlanta, GA, USA, 1988, 1319 - 1320
- [7] Laudau I D and Karimi A. Recursive algorithms for identification in closed loop: A unified approach and evaluation [J]. *Automatica*, 1997, 33(8): 1499 - 1523

- [8] Schoukens J, Pintelon R and Vandersteen G, et al. Frequency-domain system identification using non-parametric noise models estimated from a small number of data sets [J]. *Automatica*, 1997, 33(8): 1409 - 1523
- [9] Lee B K. Closed-loop system identification using the dual Youla control parametrization [J]. *Int. J. Control*, 1995, 62(5): 1175 - 1195
- [10] Guillaume P, Pintelon R and Schoukens J. Robust parametric transfer function estimation using complex logarithmic frequency response data [J]. *IEEE Trans. Automatic Control*, 1995, 40(7): 1180 - 1190
- [11] Pintelon R, Guillaume P and Rolan Y, et al. Identification of linear systems captured in a feedback loop [J]. *IEEE Trans. on Instrumental Measurement*, 1992, 41(6): 747 - 754
- [12] Schrama R J P. An open loop solution to the approximate closed-loop identification [A]. *Proc. 9th IFAC/IFORS Symposium Identification and System Parameter Estimation [C]*, IEEE Publish Society, Budapest, Magyarorszög, 1991, 1602 - 1607
- [13] Soderstrom T, Stoica P and Trulsson E. Instrumental variable methods for closed-loop systems [A]. *Proc. 10th IFAC World Congress [C]*, IEEE Publish Society, Munich, Germany, 1987, 363 - 368
- [14] Van den Hof P M J and Schrama R J P. Identification of normalized coprime plant factors from closed-loop experimental data [J]. *European J. Control*, 1995, 1(3): 62 - 74
- [15] Van den Hof P M J, Schrama R J P and Bosgra O H. Identification of normalized coprime plant factors for iterative model and controller enhancement [A]. *Proc. 32nd IEEE Conf. Decision and Control [C]*, IEEE Publish Society, San Antonio, TX, USA, 1993, 2839 - 2844
- [16] Zhang Ying, Wen Changyun and Yeng Soh. Indirect closed-loop identification by optimal instrumental variable method [J]. *Automatica*, 1997, 33(12): 2269 - 2271
- [17] Zhang W X and Feng C B. A bias-correction method for indirect identification of closed-loop systems [J]. *Automatica*, 1995, 31(7): 1019 - 1024
- [18] Zhang W X. Identification of closed-loop systems with low-order controllers [J]. *Automatica*, 1996, 32(12): 1753 - 1757
- [19] Zhang W X and Feng C B. Unbiased parameter estimation of linear systems with colored noise [J]. *Automatica*, 1997, 33(3): 969 - 973.
- [20] Zhang W X. Parametric identification of noisy closed-loop linear systems [A]. *Proc. 14th IFAC [C]*, IEEE Publish Society, Beijing, China, 1998, 301 - 306
- [21] Linard N, Anderson B D O and De Bruyne F. Identification of a nonlinear plant under nonlinear feedback using left coprime fractional based representations [J]. *Automatica*, 1999, 35(4): 655 - 667
- [22] Van den Hof P M J and Schrama R J P. An indirect method for transfer function from closed-loop data [J]. *Automatica*, 1993, 29(9): 1523 - 1527
- [23] Van den Hof P M J and Schrama R R. Identification and control-closed loop issues [J]. *Automatica*, 1995, 31(3): 1751 - 1770
- [24] Söderstrom T and Stoica P. Instrumental Variable Method for System Identification [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1983, 145 - 176
- [25] Pintelon R, Guillaume P and Rolan Y, et al. Parametric identification of transfer functions in the frequency domain: A survey [J]. *IEEE Trans. Automatic Control*, 1994, 39(11): 2245 - 2259
- [26] Ljung J. Unbiased recursive identification using model reference adaptive techniques [J]. *IEEE Trans. Automatic Control*, 1976, 21(4): 194 - 202
- [27] Dugard L and Ljung J. Recursive output error identification algorithms theory and evaluation [J]. *Automatica*, 1980, 16(2): 443 - 462
- [28] Ioannou P and Kokotovic P V. An asymptotic error analysis of identifiers and adaptive observers in the presence of parasitics [J]. *IEEE Trans. Automatic Control*, 1982, 27(3): 921 - 927
- [29] Anderson B D O and Johnson C R. On reduced-order adaptive output error identification and adaptive IIR filtering [J]. *IEEE Trans. Automatic Control*, 1992, 27(4): 248 - 251
- [30] Swami A and Mendel J M. Closed-form recursive estimation of MA coefficient using autocorrelations and third-order cumulants [J]. *IEEE Trans. Acoustics Speech and Signal Processing*, 1989, 37(7), 1794 - 1795
- [31] Swami A and Mendel J M. ARMA parameter estimation using only output cumulants [J]. *IEEE Trans. Acoustics Speech and Signal Processing*, 1990, 38(2): 1257 - 1263
- [32] Tugnait J. Identification of nonminimum phase linear stochastic systems [J]. *Automatica*, 1986, 22(11): 454 - 464
- [33] Delopoulos A and Giannakis G B. Strongly consistent identification algorithms and noise insensitive MSE criteria [J]. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1992, 40(2): 1955 - 1970
- [34] Delopoulos A and Giannakis G B. Consistent identification of stochastic linear systems with noisy input-output data [J]. *Automatica*, 1994, 30(8): 1271 - 1294
- [35] Tugnait J. Stochastic system identification with noisy input using cumulant statistics [J]. *IEEE Trans. Automatic Control*, 1992, 37(4): 476 - 485
- [36] Tugnait J. Stochastic system identification with input-output measurements using polyspectrum [J]. *IEEE Trans. Automatic Control*, 1995, 40(4): 670 - 683
- [37] Tugnait J. Identification of multivariable stochastic linear systems via polyspectral analysis given noisy input-output time domain data [J]. *IEEE Trans. Automatic Control*, 1998, 43(8): 1084 - 1100
- [38] Gevers M. Connecting identification and robust control: a new challenge [A]. *9th IFAC Symp. on System Identification [C]*, IEEE Publish Society, Los Angeles, America, 1990, 1 - 10
- [39] Astrom K J. Theory and applications of adaptive control: A survey [J]. *Automatica*, 1983, 19(1): 471 - 486
- [40] Astrom K J. Adaptive feedback control [J]. *Proc. IEEE, IEEE Society, Berlin, Germany*, 1987, 75(11): 185 - 217
- [41] Ljung J. Adaptive Control - the Model Reference Approach [M]. Marcel Dekker, New York: IEEE Society, 1979, 254 - 178
- [42] Rohrs C E. Rethinking adaptive control for the 90's [A]. *Proc. 29th. Conf. Decision and Control [C]*, IEEE Society, Melbourne, Australia, 1990, 3143 - 3145

- [69] Ebert A, Eppel M and Genthe S, et al. System restoration of a transmission network [A]. Proceedings of the Int Conference on Energy Management and Power Delivery, Part 1 [C], Singapore, Singapore, 1995, 91 - 95
- [70] Lu Qiang and Mei Shengwei. Visual research on collapse prevention and optimal operation of modern power systems [J]. Electric Power, 1999, 32(10): 25 - 28 (in Chinese)
- [71] Cheng Dazhan, Xi Zaurong and Hong Yiguang, et al. Energy-Based

stabilization of forced Hamiltonian systems with its application to power systems [J]. Control Theory and Applications, 2000, 17(6): 798 - 802

#### 本文作者简介

吴捷 1937年生,教授,博士生导师,1961年毕业于哈尔滨工业大学,主要研究方向为电力系统自动化,非线性控制,自适应控制等。

柳明 1970年生,博士研究生,研究方向为电力系统非线性控制。

(上接第 14 页)

- [43] Xu Feng and Sun Youxian. Robust identification theory and application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1994
- [44] Wu Xuguang. Robust identification on undeterministic system and development [J]. Control and Decision, 1996, 11(Suppl.1): 56 - 60
- [45] Schrama R J P and Bosgra O H. Adaptive performance enhancement by iterative identification and control design [J]. Int. J. Adaptive Control and Signal Processing, 1993, 7(7): 475 - 487
- [46] Bayard D S, Hadaegh F Y and Yam Y, et al. Automated on-orbit frequency domain identification for large structures [J]. Automatica, 1991, 27(8): 931 - 946

#### 本文作者简介

莫建林 1973年生,1996年毕业于上海交通大学能源工程系,1998年获该校电气传动自动化专业硕士学位,现为该校自动化系博士研究生,研究兴趣为系统辨识与信号处理 Email: jlmiao@263.net

王伟 1962年生,上海交通大学自动化系副教授,在德国多特蒙德大学获博士学位,研究方向为鲁棒控制。 Email: sjtuata@online.sh.cn

许晓鸣 1957年生,上海交通大学副校长,自动化系博士生导师,研究方向为复杂工业对象的智能控制。

张卫东 1967年生,上海交通大学自动化系副教授,研究方向为系统辨识与鲁棒控制。