

辨识应用上的新成果

第五届国际辨识和系统参数估计会议部分论文简介

万百五¹⁾

(西安交通大学)

摘 要

本文对第五届国际辨识和系统参数估计会议的论文作了有选择的综述和简单介绍。内容集中在：有关辨识应用上的几个重要问题，大系统、多变量系统的辨识，自适应系统的辨识，有关系统工程对象诸如交通、水源及经济模型的辨识以及辨识用的软件包等。

由国际自动控制联合会 (IFAC) 主办的第五届辨识和系统参数估计会议于 1979 年 9 月 24 日至 28 日在西德 Darmstadt 城召开，有 28 个国家的 350 多位代表参加了会议，其中包括我国五名代表。会议的目的是交流、讨论和总结自 1976 年第四届会议以来，利用辨识和参数估计方法在设计动态系统数学模型和测试讯号方面的理论及应用上的新进展。会议共提出综述报告 10 篇、实例研究 6 篇、论文 133 篇，汇编成论文集二册计 1300 多页。普遍反映，论文内容广泛而丰富，水平比前届有所提高。本届会议的特点是多变量系统、非线性系统和时变系统以及闭环系统的辨识论文有所增加。辨识应用方面的论文也有所增加，除了在经典的化工、冶金、电力和热力系统的应用外，许多论文将辨识应用于非技术性系统，如环境系统、生物系统及生物医学系统。与前几届相比的另一发展是辨识与其他方法相结合的应用。因为在一些控制系统中，最终目标如：过程控制、过程最优化、故障检测或讯号预测等是很重要的，而这些目标和系统辨识所选用的方法有很大的相互影响，所以二者需要统一处理。本文主要根据会议的论文和讨论，择要介绍辨识和系统参数估计理论在各方面应用上的新成果，新进展，特别是与多变量系统应用或系统工程有关的方面，不妥之处，请读者批评指正。

一、有关系统辨识应用的几个重要问题

(会议论文编号 S1, S3, S4, CS3)

我国对于系统辨识这一控制理论和技術的重要分支的研究，开展得很不够，然而，这个领域却很重要。自动控制经典理论在五十年代末六十年代初，以 Понтрягин 的极大值原理、Bellman 的动态规划和 Kalman 滤波以及状态空间法为标志进入了现代控制理论

本文于 1980 年 4 月 17 日收到。

1) 作者是我国出席第五届国际辨识和系统参数估计会议代表之一。

的发展时期。虽然与此同时,从最简单的开关控制(On-off Control)一直到复杂的多回路系统在各工业部门迅速地推广使用着,当时已经很明显,计算机最终将在相当范围内取代普通的PID调节器。并且,因为有了计算机辅助设计(CAD),计算机应用任何新的控制理论变得更为容易了。但是尽管计算机的价格剧烈下降,为什么现代控制理论并未象人们所预料的那样得到广泛应用呢?

目前,无论国内或国外,理论和实践的差距很大。其原因就在于上述这些理论并未完善到数字技术所可能应用和生产实际所要求的程度。这些先进理论都以已知被控对象和噪声的数学模型为前提的,实际上,恰恰缺少这些模型,因此研究建立数学模型的辨识和系统参数估计方法就大大地开展起来了。这也正是为什么和十几年前相比,系统辨识会这么受人注意的原因,不仅有国际性辨识会议,还在其他各种性质的自动控制理论和应用的学术会议上,杂志、期刊、会刊上发表了許多辨识论文,都在致力探讨这个问题。

首先,就目前的发展阶段而言,辨识这一领域的基本水平是:“与其说它是一个统一的研究课题,还不如说它是一口袋解题技巧”(S1)。但是另一方面这正说明辨识这个课题是很困难的。而这个课题的解正是大家注意的中心。目前我们只能找到参数数目很少的被噪声污染的单输入-单输出以及多输入-多输出线性离散系统的解。对于非线性系统(S4)。对于分布参数系统(S5)和多变量系统(S3),这次会议上都有综述报告。这些方面都有一种或几种具体合用的解法,但仍然是重要的研究方向。其中如非线性系统的辨识,虽然已经有梯度法、随机近似法、类线性化法、差分近似法、非线性滤波和不变嵌入等方法,美国 Mehra 在他的综述报告(S4)中也有选择地介绍了新的进展,但他仍认为这方面的研究仍处于所谓婴儿时期的初始阶段。我们在应用时都应该根据具体问题的性质,选择合适的解题方法。

第二,一个长期以来的重要现象是,人们很少能用辨识和参数估计的方法找到线性系统的阶数 $n > 3$ 的数学模型。现在,已经可以用几种不同的途径证明:由于在获得模型过程中的一些不确定因素, $n > 3$ 的数学模型是不实用的。这些不确定因素是:有限的测量精度、不可测量的噪声污染、采样时信息的损失、不恰当的数字处理过程中的讯息损失、采样次数的限制、系统模型的不适当和线性化的误差等,这些因素被认为是不可完全克服的。

此外,由于我们所采用的辨识方法,不是以系统的被估计的结构和真实结构之间的误差作为价值函数来加以极小化,事实上系统的真实结构我们并不知道,因此估计得出的参数和原参数的接近,只是在低阶系统时的一种意外收获。一般情况下,因为我们是以模型输出和系统真实输出间的误差来计算价值函数,所以模型参数只能保证二个输出之间在选定意义上的接近,这是在应用上一个很重要的概念。

第三,辨识出的数学模型的使用效果问题。数学模型通常有四种用途:控制器设计、仿真、在真实系统中不能实现的异常情况下检验系统的动态性能以及自适应控制。在开环接法下,或在与常规模拟控制器相连的闭环接法下所获得的数学模型,如果用于最佳控制设计以谋求高质量的控制,则有时会得出性能不佳甚至不稳定的令人惊异的动态过程,这是因为模型参数并不与真实参数相接近。只有在低阶对象,模型可以用来设计许多种的控制器,但不是任何种的控制器。模型用于仿真时只有在下述情况下才能提供可靠的

结果,即只有模型所处的接法与在辨识时所用的接法相同时才行。例如,辨识时系统处于开环,则模型用于仿真时也只能处于开环。在真实系统中不能实现的异常情况下,模型的使用也受到结构和参数是否与真实系统相接近的限制。在自适应控制中,情况略有不同,可以容许一个暂时不正确的辨识结果,而不用冒控制作用能否适用的风险,只要这个控制作用能使系统稳定就行。自然,控制的质量只有当模型尽可能接近真实系统时才会达到最佳。

二、智能控制系统的辨识问题(S9)

从系统工程角度看,人们感兴趣于美国 Saridis 所作的递阶智能控制系统的辨识方法的报告,它综述了这方面近来的进展和经验。近几年来提出了几种方法来管理或控制复杂的大系统,其中主要有分散控制、递阶控制和决策理论控制方法。但是由于它们的解很复杂,需要大量计算及对各种性能模式和系统的不确定性的适应性差,只得到了有限的应用。而递阶智能控制则较为成功地解决了上述问题,其办法是对于制订决策的步骤采取递阶结构,使得在较低层的决策智能要求较低,但是精度要求较高。按此原则,系统共分为三层,与操作人员能进行交互的高层,其工作转向决策制订,同时增加它对于各种环境和所需行为特性的适应性。在另一方面,下层的控制器只操纵经过有选择地分解后的较小的子系统(物理过程),它们虽与环境交互作用但不担负辨识环境和系统性能变动的任务。计算机在中间一层将上、下二层协调起来,其目的是对子系统之间所有可能的控制局面的组合进行协调,以改进大系统的总的动态性能。

在递阶智能控制系统中模型的辨识工作因层而异,但都以隐或显的方式实时地进行。在各下层子系统则利用快速微型计算机并行地进行辨识,而在高层——组织层和协调层则采用有较大记忆容量的较大型计算机。在低层,它们的模型是经典的,可用微分、差分 and 积分方程加以描述的而包含有限数目的未知参数。因此,辨识的目的在于获得未确定的参数值。所用的方法可以是极大似然估计、随机近似、广义最小二乘法等等。在协调层,辨识问题是从子系统来的测量数据和组织层来的输入命令来获得合适的协调类(Coordination Classes)。这里可以用统计方法、模糊方法或在模式识别中应用的语句方法(Syntactic Method)。在组织层,辨识问题等于翻译操作人员的定性命令并对系统的其他输入作出解释,所用方法是统计方法或语句方法等。

三、采用可移动的控制机实验室对玻璃炉 进行辨识和自适应控制(CS4)

匈牙利 Haber 等人利用一个可移动的控制机实验室(装在一个汽车的拖车里)配以过程控制用交互的程序软件包 MERCEDES,对一个玻璃炉进行辨识和自适应控制,取得了较好效果,这是这次会议上六个实例研究之一。

玻璃炉原用常规调节器进行控制。但是为了改进控制质量,采用计算机控制,论文用辨识和参数估计方法对炉子进行深入研究。辨识和参数估计所需的数据取自新设计的实验。实验在正常生产中进行,不能影响生产,为此,只能短时开断调节回路,并加入一些扰

动。用经验分析法分析所记录的时间曲线,可以决定模型的类型。结构分析法则用来研究模型的纯滞后时间和阶数。参数估计则采用 Talmon 1971 年的第二扩展的矩阵法。模型结构的决定是基于采用不同的结构而进行重复的参数估计,然后根据几个测试系数而选择其中的最优结构。对于有些通道,都要用叠加原理决定不同控制变量的影响。

由于熔融玻璃的液位是影响产品质量的决定性因素,因此利用控制机上的软件系统,将炉子的液面回路进行自适应的控制。由辨识实验表明:炉子的数学模型中各通道都有其主要的占优势的作用量,所以可以利用单输入-单输出自校正 (Self-tuning) 调节器的原理,来补偿液面的快和慢的随机波动。考虑到辨识的结果,液位的数学模型是带积分环节的,所以采用对象具有积分特性的自校正策略——Wittenmark 方法。

计算机自适应控制的结果表明:玻璃液位随机波动明显减弱,熔融液面上玻璃混合物更为均匀,玻璃较易熔化,因而节约了燃料,这些都是胜过常规调节器之处。且辨识和自适应控制对炉子的结构、工艺和力能学揭示了一些新问题。

四、用统计辨识对超临界热电装置进行最优控制(CS5)

日本九州电力公司的中村和日本在辨识理论方面的权威赤池 (Akaike) 合作研究了一个超临界的锅炉-透平机组。大容量高温高压的发电用锅炉,其出口蒸汽温度必须保持在它的额定值附近,偏差在百分之一、二之内,以维持正常运行效率,保证安全和设备寿命。锅炉控制的主要目的是,在正常运行条件下尽快地增加或减少蒸汽的生成以适应负荷变动的需要。

锅炉是一个典型的多变量系统,常规的 PID 调节器不能完全补偿诸回路间的相互影响,也不能适应快且大的负荷变动而保持被调量如频率、电压等在预先规定范围内。实行最优控制的基本问题是,如何获得对象的实用状态方程。理论上的探索导至要建立一组描述对象能量和质量平衡的偏微分联立方程。但是线性化后获得的模型阶数很高,不合实用,同时又加上对象中噪声的存在,增大了辨识研究的困难。而日本学者很好地解决了这个问题,本文也是六个实例研究之一。

中村等在正常运行条件下,应用统计研究法既考虑到了动态过程又考虑到了噪声,选用了自回归 (AR) 模型。在控制结构上,采用 ADC (模拟数字控制) 系统。由一个数字计算机和常规 PID 控制器合作,因此进入锅炉对象的是 PID 控制器讯号和计算机讯号之和。在一般工业中控制机用作数字直接控制 DDC。在 DDC 中因系统特性变动而造成的被控变量的静态误差,在 ADC 系统中很容易用 PID 控制器来补偿。同时 ADC 系统可靠性高,一旦计算机发生故障,PID 控制器立刻担负起全部的工作。所以此 ADC 系统优于 DDC 系统。这是该论文的一个特点。

辨识具体步骤如下:用计算机产生四组准随机测试讯号,通过 D/A 变换器加入到机组四处,从系统变量的实验数据中建立自回归模型,模型的系数阵用极大似然估计方法,并求解 Yule-Waker 方程得到。用赤池的讯息准则 AIC 来决定模型的阶数。下一步需分析系统的一些特性,包括噪声的统计性质和在系统变量中所占的份量,并研究系统变量的功率谱密度和变量之间的脉冲响应函数。用这些讯息决定最后模型中所用的系统变

量. 由状态方程以及一个二次型的价值函数, 用动态规划方法解出了状态反馈的增益矩阵. 此后用 Monte Carlo 试验, 以决定此反馈增益矩阵是否合适. 以上的步骤完全包括在 TIMSAC 软件包内.

一年多的实际运行实践表明: ADC 系统在正常运行条件下给出优越的控制性能, 并对于镇定异常大的干扰是十分有用的, 它比常规 PID 调节器要好得多. 九州电力公司决定把它推广到正在建造的其他 50 万千瓦和 60 万千瓦的超临界机组上.

五、法国牛群模型(CS6)

近 20 年来, 特别是生态学问世以后, 发展了一个叫作“族数动力学”(Population Dynamics) 的与系统工程有关的领域. 它的直接目的在于, 建立生物种族数的数学模型或计算机仿真, 并研究族数的预测和控制. 人口模型的研究只是其中一个方面. 而这篇由法国 Rault 等人写的论文, 建立了全国数亿头牛的数学模型也属于这个领域, 它可以用来帮助农业部中政策制订者理解和控制牛奶、菜牛生产之用. 本文也是六个实例研究之一.

所采用的数学模型是, 带控制量的状态变量差分方程式. 因为要研究牛奶生产, 所以采样间隔 $\Delta t = 1$ 月. 公、母牛结合在一起的状态变量共有 86 维, 形成了大型详尽模型.

重要问题是如何利用辨识和参数估计理论来进行参数估计. 现存统计资料有二种, 一种是以月为单位的数据: 屠宰数、进出口差额(以上为控制量)、奶产量; 另一种是以年为单位的数据: 按年龄统计的公、母牛数目. 任务就在于: 根据这些输入、输出数据确定状态方程所采用的近 20 个参数.

实践证明: 因为模型维数太大并且是发散的不稳定模型, 直接辨识并不合适, 因此先将模型集结到低维(9 维), 等于状态变量按年划分, 以后再分扩 (Disaggregation) 回复到大模型.

所观测到的输出、输入数据(统计资料)都有一定的不确定性. 例如按月屠宰量, 这个数据取自屠宰厂, 系根据牲畜齿数而折算到年龄的. 这就引入了某些随机误差. Rault 等人利用 Kalman 滤波对数据进行平滑-预处理.

上述数学模型具有正系数矩阵, 属于不稳定的系统, 它有一个主要特征值. 因此, 这是不稳定的, 输出、输入数据都被噪声污染的线性系统辨识问题. Rault 等人利用极大似然估计法求解参数向量. 由此获得的数学模型的输出, 与实际统计资料相比较(每个年龄都比较)吻合的相当好.

为了取得奶产量的模型, 要引用按年模型中所求得的一些参数, 并将年屠宰量分扩到按月计算, 成为按月模型的输入量. 这样求得的按月模型, 其输出与实际奶产量的统计资料相比, 吻合的也较好.

实践证明: 这些模型要比把系统当作黑箱处理而得出的统计模型要好得多. 后者只能作短期预测, 不能对政策制订者有所帮助, 详尽模型很接近实际情况, 但很不易辨识. 论文较好地解决了这个问题.

六、自适应控制系统的辨识

(S1, CS3, CS1, A1.3, A7.5, A7.6, A7.8, C2, C3)

如在第一节所讲到的,在闭环系统接法下进行辨识并用之于自适应控制能满足一些限制或约束.苏联和东欧国家都认为,自适应系统的辨识(ASI)和控制是一个最重要的发展领域.本届会议有十七篇论文专门讨论自适应控制的理论或应用.苏联在辨识方面的权威 Rajbman 认为自适应系统的辨识还处在婴儿时期,有着巨大的发展前途.

在自适应控制中,如果计算机的适应性控制间隔和系统辨识的采样间隔是重合的,则在每一个采样瞬间,系统的模型根据最新的采样讯息加以更新,而且马上用它来修正控制器参数.因此,在每一个采样瞬间,都相继进行系统动力学的辨识和控制器设计.为了在采样间隔中使算术运算次数不超过一个合理的限度,所用的算法不能是很复杂的.

除了已介绍的玻璃炉液位自适应控制外,在空间和航空飞行器方面有三篇论文涉及到自适应系统的辨识工作.其中苏联 Nikolaev 等人的论文,讨论飞机数字自适应控制系统的参数辨识的算法设计问题(A7.5).辨识算法基于最小二乘法,为了防止噪声,符合于给定的精度要求,不加测试讯号,是以突然插入式的短时间运算的算法,在一个 32 位浮点机载数字计算机 ADC 上实现的,对飞机在整个飞行路线上的参数进行在线闭环辨识,以便改进控制性能.美国 Merrill 等研究了涡轮喷气发动机的辨识和双自适应控制(A7.6).论文用机载数字计算机对高度非线性的发动机性能进行监督和控制.在辨识方面采用 Tse 和 Weinert 法以获得模型的阶数和结构.美国 Young 的论文研究一个高性能火箭的自适应控制问题.论文作者用递推的参数估计算法和状态变量反馈增益算法,取代了原来的预设计的增益程序(Gain Schedule).

可以预见:随着计算机价格的急剧下降,自适应系统的辨识和控制,必将受到更多的注意,将在工业过程控制中得到巨大的发展.英国 Clarke 等人和美国 Mc Innis 等人的论文便是这方面的先驱.前者将微型计算机作为自校正调节器,用于工业过程的自适应控制(CS3),软件内有递推参数估计器这一关键部分,用以进行过程辨识,举例应用于室温、酸的中和以及批量生产的化学反应器的控制.该文也是这次会议的六个实例研究之一.后者将微型计算机作为自适应控制器,用于废水处理过程的实验室模型中溶解氧浓度的控制,是基于最小均方的算法来辨识模型参数的,自适应控制器的总结构相似于 Åström 和 Wittenmark 的自校正调节器(A1.3).

在自适应控制系统的辨识中,一个重要的问题是提高辨识的质量.所谓质量,这里理解为所需要的对于系统输出的预测质量.由于微型计算机的应用,为了降低计算机的价格,必定要求在辨识和参数估计时选用更有效的算法,要在 8 或 16 位字长情况下进行所有的计算.算法要有合适的收敛性,并且要求降低运算次数、减少存储容量、增加估计的精度.而后面这些即使在一般的辨识应用中也是当前有待解决的课题.

七、交通、水源和经济模型(A1.1, A1.5, C4.2, C4.4)

近十年来,交通、水源和经济问题都在应用控制理论或系统工程方法进行规划、管理

和控制。

西德 Cremer 等人的“交通车流模型的参数辨识”一文 (A1.1), 专门研究几公里长一段单向高速公路的数学模型, 作者用一组非线性确定性差分方程来作为数学模型, 描述在可能的车辆密度范围内的交通车流动力学。而许多模型参数, 则根据实际的交通车流观测数据作为参数最优化问题来处理, 并用非线性规划求解。在许多工业化的国家里, 对于超载和拥挤的公路可以采用这类模型来实现多种目的: 如系统分析、交通仿真和预测、数据处理以及发展和决定采用何种控制策略。

东德 Hoffmeyer-Zlothik 等的“河流的有限制的模型研究” (A1.5) 是一篇关于 Werra 河上游流域根据水量计记录数据, 针对一些限制采用二种模型拟合, 每种模型又用五种方法估计参数的有趣论文。其特点是较过去类似研究详尽且精确性有所提高。论文所选用的模型以线性定常多变量系统的“ P -规范式结构”为基础。每个子系统(支流)采用河流模型理论性系统分析中所习用的滞后单元来表示。最后模型成为离散权函数和差分方程二种型式。参数估计采用五种方法: 1) 隆起回归分析法(Ridge Regression); 2) 回归分析法; 3) 输入数据加以正交化的估计法; 4) 对参数施加限制的回归法; 5) 输入数据正交化并对参数施加限制的回归法。结果证明: 第 5 个方法对于输入有强相关的动态系统来说是一个充分有效的方法。

最后简单介绍二篇辨识和参数估计在社会经济系统方面应用的论文。巴西 Castrucci 等的论文“辨识和最佳控制应用于巴西指数过程 (Index Process)”是其中之一 (C4.2)。巴西政府采用一个法定的公式确定货币修正指数 CI (Monetary Correction Index), 并通过经济结构来影响物价指数 (Price Index)。围绕这样一个国家的复杂的经济和财政结构, 建立了一个单输入-单输出的回路。基于 108 对历史数据, 利用 Box 和 Jenkins (1970) 提出的时间序列分析方法和参数的最佳估计方法, 论文作者辨识了单回路经济结构的 ARMA 模型。模型利用 χ^2 试验加以校核。利用上述模型就可以回答经济学家所盼望了解的系统稳定性问题。此外, 论文利用自动控制理论中的最优随机控制(最小方差)概念, 推导了一个最优修正公式, 计算机仿真证实了新公式较原有法定公式的优越性。

西德 Fisher 等的“复杂经济过程的单变量模型和传递函数分析”一文证实了: 时间序列分析方法是对于未来经济情况预测的一个有效工具。论文采用“Box-Jenkins 研究法”, 包括单变量模型建立和传递函数分析, 特别是单变量 ARIMA 模型。论文中将这些方法成功地用于三个实际例子。

八、辨识用软件包 (M4.4, M6.7, C1.1)

这是目前各国学者共同关心的研究课题之一。程序包一般分为通用计算机用的离线计算程序包和专用机用的在线实时计算程序包二种, 大多都和操作者有交互, 而且数学模型的阶数、纯滞后时间、采样间隔以及被估计的参数等最后都在屏上显示出来或制表输出。

在本届会议上, 日本学者古田胜久 (K. Furuta) 等和西德学者 Blanke-Bohne 分别研制了线性多变量系统的软件包 (M4.4, M6.7)。最吸引注意的是西德 Schmid 和

Unbehauen 二人研制的软件包 KEDDC, 它具有可携带的模块型式, 用于中型控制机, 如 HP1000 或 HP2000, 专门研制以辨识和设计各种各样的控制工程 (D1.1)。目前已包括有 560 个模块, 采用很多种不同的经典以及现代的理论方法进行过程辨识、控制器设计和数字仿真测试。对于过程辨识和控制器设计的结合以及自适应控制则特别作为重点来考虑。此外控制算法的使用和在线实现也自然包括在包内。为了实现上述各项要求, 软件包应完成下列工作: 讯号分析、离线及在线辨识、控制器设计、仿真和数字直接控制(或自适应控制)。每一项工作又按求解的办法分成几个子方法, 这样就列成一张子方法一览表。论文中共有四张: 一张用于辨识, 一张用于控制系统设计, 一张用于自适应控制系统设计, 另一张用于介绍几种稳定的自适应控制的算法。同时软件包设计得具有如下特征: 方法的多样性; 成块性——采用模块, 可在在线工作时增加或减少模块, 因此伸缩性很大; 交互性——容许命令或数据在运算过程中进入或中断, 同时对使用者有询问或提醒; 多使用性——可以多个使用者对一台中型控制机利用显示终端更有效地使用。此外, 控制系统有九种表达式: 1) 确定性或随机性输入和(或)输出讯号的序列; 2) 自相关或互相关函数值的序列; 3) 离散的脉冲响应; 4) 离散的阶数响应; 5) S -传递函数; 6) Z -传递函数; 7) 离散的频率响应; 8) 连续状态空间的矩阵式; 9) 离散状态空间的矩阵式。这些表达式可以相互转化。由此可见: KEDDC 软件包是设计、辨识自动控制系统, 包括自适应系统的强有力工具。

NEW RESULTS IN IDENTIFICATION APPLICATION

SELECTED SURVEY ABOUT 5th WORLD SYMPOSIUM ON IDENTIFICATION AND SYSTEM PARAMETER ESTIMATION

WAN BAIWU

(Xi'an Jiaotong University)

ABSTRACT

The paper gives a selected survey about 5th world symposium on Identification and System Parameter Estimation. The attention is paid to: some important problems about identification application, identification of large-scale-system and multivariable system, adaptive system identification, identification of some system engineering objects such as traffic flow, water source and socio-economical system, software package of identification etc..