

編 号: (76)011

內 部

出国参观考察报告

国外自动控制技术现状及
某些发展动向

科学技术文献出版社

出国参观考察报告

国外自动控制技术现状及某些发展动向

(内部发行)

编辑者: 中国科学技术情报研究所

出版者: 科学技术文献出版社

印刷者: 中国科学技术情报研究所印刷厂

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

开本 $787 \times 1092 \cdot \frac{1}{16}$ 5.25 印张 128 千字

统一书号: 15176·205 定价: 0.60元

1976年10月出版

毛主席语录

什么‘三项指示为纲’，安定团结不是不要阶级斗争，阶级斗争是纲，其余都是目。

自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业、干农业、干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。

应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

目 录

一、概况	(1)
二、自动控制理论的发展动向	(2)
三、自动控制技术的应用	(8)
四、系统工程的理论和应用	(16)
五、自动化系统中应用计算机的发展动向	(33)
六、控制元件和仪表	(37)
七、空间自动控制的若干情况	(38)
八、参观美法工厂纪要	(53)

资料 1 . 国际自动控制联合会介绍

资料 2 . 论文题目

国外自动控制技术现状及 某些发展动向

中国自动化学会代表团

前 言

这份报告记述了国际自动控制联合会 (IFAC) 第六届世界大会及会员国代表大会 的概况, 概要地介绍了国际自动控制技术的现状及某些发展动向, 并介绍了代表团在美、法两国的参观情况。

自动控制技术领域很广, 由于代表团成员政治水平及专业所限, 报告中会有错误之处, 名词术语也会有不妥之处, 请批评指正。

一、概 况

国际自动控制联合会于一九五七年九月在巴黎正式成立。我国是该会的创始国和 成员国。我国曾派出代表团出席了一九六〇年在莫斯科召开的第一届世界大会和一九六三年在瑞士召开的第二届世界大会。此后, 我国未派代表团参加该会活动。为了了解国际自动控制技术的现状和发展动向以及国际自动控制联合会的背景和今后的活动, 中国自动化学会代表团出席了一九七五年八月在美国波士顿召开的第六届世界大会。

大会自八月二十五日至八月三十日, 共开了五天。参加这次大会的会员国共三十个 (罗马尼亚、朝鲜、阿尔及利亚、墨西哥、古巴、比利时、土耳其、希腊等国未出席)。参加会议的人数共约1200人, 其中我国7人, 美国300人、苏联76人、法国39人、日本38人、英国37人等。

会议学术报告共分9个专题, 63个小组会, 提供论文331篇, 是历届大会以来论文最多的一次。从论文分布来看, 理论方面90篇, 应用方面83篇, 系统工程方面63篇, 计算机应用方面28篇, 空间技术方面27篇, 元件仪表方面19篇, 经济和管理系统方面10篇, 自动化对社会的影响6篇, 教育方面5篇。这次大会的论文, 由于是由各会员国自己推选的, 所以数目虽多, 其水平与专业方面颇不平衡。元件仪表方面的论文比较少。我代表团根据参加人数, 只分别参加了11次小组讨论会。

全体会议上 有8篇综述报告, 我代表团选听了几个, 其内容一般。苏美两霸临时塞进大会的阿波罗—联盟号对接飞行实验报告会, 我代表团决定不出席。会议安排了13次专题圆桌讨论会, 由于时间关系, 我们均未参加。会议期间, 大会安排参观波士顿地区的工厂、实验室等共9个单位, 我们分别参观了8个。此外, 在美国还参观了两个展览会, 在回国途中,

还参观了法国两个计算机公司。

大会期间，召开了会员国代表大会，议程包括：通过上届大会的总结报告、司库收支报告；讨论增加会费及秘书处迁址问题；选举理事会等。代表大会最后通过增加会费23%（我国投赞成票，苏修及一些东欧国家弃权）；决定秘书处今后设在选出的主席所在国（我国投赞成票）；选出了下一届理事会的一般理事（主席、副主席及司库因无反对，自动当选，通过了上届理事会提出的七个一般理事候选人，即加拿大、西德、意大利、荷兰、西班牙、波兰和苏联。由法国和埃及补提的本国候选人未能入选）。芬兰的罗托任下届大会主席，日本的椿木任第一副主席，匈牙利的瓦莫斯任第二副主席。根据1971年6月理事会的决定，第七届世界大会将于1978年夏在芬兰举行，根据1972年巴黎理事会的决定，第八届世界大会将于1981年8月在日本举行。国际自动控制联合会原设有十个技术委员会，这次理事会又决定增设控制数学，生物医学工程和生产技术等三个技术委员会。1976年将召开空间自动控制技术等十六个专题学术讨论会，1977年将召开数字计算机应用等十七个专题学术讨论会。在会议期间，理事会，技术委员会及其它行政性委员会还多次召开了会议，我均未参加。

二、自动控制理论的发展动向

这次会议共宣读了理论方面的论文有九十篇。现将有关动向分述如下。

（一）分布参数系统

一般物理系统的数学模型是由偏微分方程来描述的，例如热传导、弹性振动、流体运动、电磁波等。这次会议中有分布参数系统的论文十六篇，讨论了以下三方面的问题：

1. 参数辨识

Goodson和Polis^[8·2]综述了148篇有关分布参数系统的参数辨识的论文。问题是如何用实验方法来了解实际世界，从而确定一个反映客观实际的数学模型中的参数。这方面的工作，应用面非常广泛，包括弹性结构设计，热交换和质量交换过程的设计，地球物理分析，如地下水源、石油勘探、地震研究、气象预报等。已有的工作分别进行了下列几方面的研究：

- a. 物理系统的数学描述，包括未知参数、边界条件和初始条件、干扰噪声、模型误差等。
- b. 选择求解数学方程的方法，研究近似解法。
- c. 决定测量方式和测点的空间位置。
- d. 选择对误差的质量判据。
- e. 进行灵敏度分析：包括参数解的灵敏度和质量判据对参数的灵敏度。
- f. 进行实验设计，取得数据。
- g. 选择最优化逼近算法和各种滤波方法。
- h. 进行误差分析。

作者从文献中根据上述八个方面进行了分析。例如研究能观性和测量点位置的有二十

篇,但至今还没有一个线性或非线性分布参数系统能观性的一般理论,只有一些特殊线性系统的能观性判据;也没有决定最佳测点的一般方法,只能对每个具体问题在一定范围的参数和噪声统计特征等范围内用的值求解,进行比较。

对于线性分布参数系统,如果其结构是已知的,一般要求求解偏微分方程的解析解,将问题变成代数方程的参数估算。对于非线性分布参数系统的参数估算,尚无一般方法。

2. 状态估算

Ray^[8.1]综述了有关分布参数状态估算和应用的七十一篇论文。状态估算最直接的方法是将分布参数集中化,如有限差分、模型表示、仿样(Spline)等。但是这些方法数学上不够严格。最近从全分布参数系统模型来进行状态估算的方法有“形式”法,如求一个误差泛函的极小化,和“严格”法,如处理状态变量的概率分布;对于线性系统可以求得比较严格的结果。取得一些具体结果的有时延系统、用二阶偏微分方程来描述的线性和非线性系统、用积分和积一微分方程来描述的线性系统、随机控制的分解原理,以及作者最近的工作,具有移动边界的分布参数系统等。

在应用方面,由于计算工作量大和模型误差等问题,目前主要还处于用计算机进行做真试验阶段,只有少数工作是从实际系统中取得数据进行事后处理,个别工作、如热传导系统能进行实时状态估算然后闭路控制的。进行得比较多的工作有导热体温度分布的估计,化学反应器的温度、浓度和催化剂活性的估算、空气和水污染检测系统中有害物浓度的估算等。此外,会议中意大利Caravani等^[8.3]一文对于用一维抛物方程描述的扩散过程,研究用单点测量来估算初始状态,求得一个根据一定误差要求选择测点的准则和估算方法。

3. 控制问题

近十年来分布参数系统的最优控制问题被广泛进行研究。主要工作包括 Butkovskiy, Lions, Russel和王耿杰(P. K. C. Wang)等把应用于集中参数系统的极大值原理、变分法和动态规划推广和延伸到分布参数系统。但是有关分布参数系统的理论问题比集中参数系统的要困难得多。Russell^[1.4]讨论了这方面的问题,一些集中参数系统的性质如能控性、能观性、稳定性等不能直接推广到分布参数系统。例如,对于集中参数系统,时间可移性(即如果在 $(0, T)$, $T > 0$ 区间上是能控的,那么在 $(0, \tau)$, $\tau > 0$ 间也是能控的。)和时间可逆性(即初始状态或终端状态取零,控制过程是可逆的。)都是适用的。而对于双曲线型波动方程时间可逆性适用,但可移性由于讯号传递的时延而不能适用。对于抛物线型热传导方程,时间可移性适用而可逆性不能适用。目前能控性和能观性的两重性问题虽已解决,但对于能控性的条件只能在状态终端位于状态函数空间的一个稠密子空间内求得(近似能控性)。稳定性问题只有双曲线系统取得有限的进展。此外,边界控制问题还没有得到解决。

法 Yvon^[1.1]一文综述了线性和非线性抛物线型分布参数系统的控制算法。对于开环控制,一些数学规划方法已被采用^[57.4]。这些方法可以看作是无穷维空间的最优化问题。常用的非线性规划如最速下降、共轭梯度、拟线性化等仍可采用。对于闭环控制,要求对于任意初始条件,都能给出最优解。只有对线性系统、二次泛函指标有一般解。对于非线性系统就没有一般解,常用的方法是在最优轨迹上线性化。对于“实时控制”建议采用的方法有三种:

(1) 将状态方程简化为 n 个常微分方程。

(2) 用次优反馈控制, 如将控制事前规定为

$$\tilde{U}(t) = K(y^{(t)})$$

其中, $y(t)$ 为状态, K 可以在一类函数中最优选取。

(3) 将闭环控制简化为一系列的开环最优控制问题。在状态方程中加一项 ξ , 先假定 $\xi = 0$, 求最优控制 u , 然后在某一时刻, 由观测到的系统状态更新控制, 逐步推下去。

实现分布参数系统最优控制的计算量一般都是很大的, 例如西德 Franke 和 Schrodi^[8·4] 在“辐射加热器非线性分布过程的最优控制”一文中采用 Butkovskiy 积分方程的递推解来求解最优控制问题, 由于计算量大, 即使是现代数字计算机也不够快, 文章提出了用混合机进行的计算方法。

由于控制力往往不是分布地作用在整个对象上, 法国 Amouroux 和 Babany^[1·2] 介绍了线性定常抛物线型分布参数系统的点控制问题。他们采用有限维次优控制, 即对一定近似程度的 N “振型”实现最优控制; 讨论了几种取得最佳作用点的判据, 一种是基于有限维控制范数的最小化。最优测量点也可以用类似方法求得。

苏联 Butkovskiy^[1·5] 提出了线性分布参数系统方块结构理论, 将集中参数系统的方块结构理论推广到分布参数系统, 在齐次边界条件和零初始条件下, 对于边界值问题的格林函数进行拉氏变换, 得到传递函数。文章推导出这些方块并联、串联和反馈时的传递函数, 从而可以由其特征值和特征函数求解分布参数系统的稳定性、能控性和综合问题。对于用集中参数控制器来控制分布参数系统的分析是有实际意义的。

(二) 适 应 性 控 制

本届大会关于适应性控制问题, 有三个专题小组讨论会: 模型参考适应性系统, 数字适应性系统和最优适应控制。共有十六篇论文, 可以看出, 由于数字计算机的普遍应用和一些理论问题的解决, 适应性控制在实际应用方面有了一些进展。不少作者力图将适应性控制应用于导弹、飞机及船舶的自动驾驶仪、原子能电站、造纸厂、机器人以及假肢的控制等。

1. 模型参考适应性系统

美国 R. L. Carroll 等^[58·3] 讨论了只用输入输出信号进行辨识及估算的模型参考适应性控制系统。

文章指出, 应用 Liapunov 稳定理论于辨识与控制问题时, 由于要求测得全部状态变量而受到限制。但在某些系统, 应用 Kalman-Yakubovich 定理后, 上述要求可以放宽。如果采用适应观测器和动态补偿的模型参考适应性控制时, 只要测出输入和输出信号, 即可运用 Liapunov 理论于系统的设计。

适应观测器和动态补偿的模型参考适应性控制系统, 都要运用状态变量滤波概念。即未测量的系统变量可以由已测变量的滤波导数来代替。为此, 建立了相应的算法, 目前适应观测器可以用于许多线性的, 慢变化的, 单输入输出系统和一定条件下的线性多输出系统; 动态补偿模型参考适应性系统则可以用于非线性, 非自主的单输入输出系统。

法国的 B. Courtiol 等^[58·2] 介绍了应用模型参考适应性控制技术于电机系统的控制。

文章指出, 采用适应性控制技术可以改善电机系统过程控制的性能。一般有两种模型参考适应性控制结构: 一种是间接适应性控制结构, 它要求在线过程参数辨识和状态向量估

算；另一种是直接适应性控制结构，它不要求在线过程参数估算，但要知道参数变化空间。进行适当的近似以后，可以设计出适用于电机系统的高性能适应性控制结构。作者指出，利用模型参考适应性控制系统概念去综合直接或间接适应性控制结构，解决了三种常见的电机系统过程的控制问题。

荷兰的J. Van Amerongen等^[58·1]介绍了用梯度法设计模型参考适应性稳定控制系统的方法。

用于适应性系统的梯度法技术是一种辨识技术的修正。模型与控制对象间的参数失调而引起的“方程误差”可以按照连续梯度规律而减小；而方程误差则可以从响应误差转换而来。这种方法已应用于船舶自动驾驶仪的设计上，并进行了混合模拟试验。船及普通自动驾驶仪部分在模拟机上模拟，适应性部分则在数字机上进行模拟（AD4-1BM 1800结构）。

美国的Paul Berry等^[58·5]介绍了一种数字适应性最佳线性调节飞行控制器。

适应性控制系统具有对运行中参数和环境变化的自动补偿的能力；数字技术则有体积小，重量轻，可靠性高，适于设计复杂的控制器以及适于分时多路控制等优点，故数字适应性控制系统很适宜于飞机的控制。此系统包括一个在线加权最小二乘参数辨识器，一个卡尔曼状态滤波器和一个应用最佳线性调节理论建立的控制模型。在设计参数适应性控制系统时，采用了进行在线参数辨识的显适应性系统，而未采用隐适应性系统。文章给出了用典型战斗机数据进行模拟试验的结果。

法国的I.D.Landau等^[58·4]介绍了离散时间模型参考适应性系统的算法。

模型参考适应性系统与其它适应性控制技术不同，其优点之一就是它不要求线性或非线性方程组的实时解，因而在应用此系统时，其计算量较小。而小型计算机及微型计算机的发展，对于应用模型参考适应性系统则打开了大门。但使用数字计算机就要求有相应的算法。文章导出了离散时间模型参考适应性系统的基本算法，给出了用于参数辨识的几种特殊算法和适合于适应性模型随动控制系统的算法，并给出了这些算法在造纸机、热交换器等方面实际应用的情况。

2. 数字适应性系统

美国的T.Lonescu等^[50·5]介绍了具有增大误差信号的离散模型参考适应性系统。

文章讨论了只用对象的输入输出讯号，设计离散模型参考适应性控制系统的方法，按照Liapunov第二方法，研制了单输入单输出，非线性，非自主式对象的控制器。用输出端的低通滤波器的信号以代替预期的对象的输出值。过去将扩大误差信号方法用于连续模型参考适应性系统，现在则将此方法应用于离散系统。

美国的G.N.Saridis等^[50·4]介绍了自组织控制在可训练的机器人和自学习假肢上的应用。

自组织控制可用来处理不确定动态系统。“参数适应性”自组织控制可以辨识系统动态的不确定性；而“性能适应性”自组织控制则可以改善其不确定性。文章对参数适应性和性能适应性所用的一些算法进行了比较。这些算法要求使用小型计算机。

瑞典的K.J.Astrom等^[50·1]介绍了慢变参量工业过程自调整调节器的设计。它可免去耗费时间的对象实验过程，参数估算和控制设计，这种调节器由三部分组成：参数估算器，线性控制器和从估算参数确定控制器参数的组合。文章还介绍了在矿石粉碎机，造纸机，热交换器等方面的应用。

加拿大的N.K.Sinha等^(50·6)介绍了原子能发电站的适应性控制问题。系统要求功率变化的响应应当与初始功率与最终功率级间的斜升相逼近,用最优二阶线性模型去近似地描述对象,可以使在线辨识问题大为简化,然后计算采用积分绝对误差或最小最大误差判据的最佳系统响应的反馈系数。模拟实验结果表明,用二阶模型得出的次优控制与实际上要求的最优是相当一致的。

美国的E.H.Bristol介绍了在适应性控制中,用图形识别以代替参数辨识的方法。即用计算机去表征瞬态特性,并计算重新适应的参数以使控制特性逼近所要求的瞬态“形状”。文章还给出了模拟实验的结果。

苏联的N.S.Rajbman等^(50·2)介绍了具有在线辨识器的过程控制。在系统内接有辨识器和控制器,它可以连续修正对象模型以得到满意的控制性能,它适用于冶金与化工等过程控制。

3. 最优适应控制

美国Henson和Womack^(37·1)提出“时间域非敏感的特定最佳系统设计”一文,讨论了一个在时间域进行设计的算法,对于固定系统结构而参数发生慢变化或有一些非随机扰动的情況下,保证输出特性基本不变。方法是在最优指标中除状态偏差外加上一个灵敏度指标。

$$J_{DO} = J_0 + J_s = \int_{t_0}^{t_f} \underline{X}' S \underline{X} dt + \int_0^{t_f} \left(\sum_{i=1}^q \underline{Z}_i' W_i \underline{Z}_i \right) dt$$

式中 $\underline{Z}_i$ 为灵敏度系数矢量,即状态矢量 $\underline{X}$ 对 i 个对象参数的偏导数。权重矩阵 S 和 W_i 等是基于要求的状态轨迹特性和权衡最优状态响应和对一些关键参数的不敏感的要求而选取的。这是用最优控制技术来解决适应控制问题,和一些用李亚普诺夫函数设计适应性控制器^(37·5)的方法都属于直接综合适应性控制的方法。文章介绍了应用这个方法来选择土星V运载工具十三阶模型控制增益和滤波系数问题以及一个大型空间望远镜控制回路的数字控制滤波问题。

美国Horowitz等^(37·2)提出了一个具有对象不确定性的非线性系统的综合理论。将问题归纳为具有有限个输入的反饋系统,对于每个输入有一个响应公差的范围。综合方法保证在一定不确定性下对规定输入的响应在容许要求之内。这样将非线性系统转变为具有参数不确定性的等价线性定常系统。这个方法可以看成是描述函数法的推广;虽然要用不常用的数学来证明其存在性,但设计方法仅包括简单的频率响应法。两个尚未解决的关键问题是:系统对于非设计时规定的输入的响应,和综合系统要求的非线性前置滤波器的方法。

苏联Petrov等^(37·5)介绍了非搜索型自调整系统的理论基础和发展方向。文章建议了这类系统数学模型的近似解法。当系统是完全能控和能测时,可以用李亚普诺夫直接法来综合。

(三) 其他理论问题

这次会议中,对于线性系统、随机控制、代数方法、非线性滤波、稳定性问题和微分对策等理论都有所讨论。

对于多变量线性系统,^(39·12)进一步完善了Wang和Davison 1973年提出的用最少数目动态元件实现满足给定动态特性的所谓最小设计问题,给出一个改进的两步算法,得到包括存在性的完整解。线性系统理论中近几年来提出的所谓“鲁棒调节器”(图2—1),主要是对

付具有干扰和参数不太清楚的对象（只有比较粗的了解）的调节问题，当对象参数在一定范围内摆动时，系统仍具有渐近跟踪和稳定的性质。Davison等人^[9·5]用线性系统理论，Staats等人^[43·4]用几何方法证明了一个多变量线性定常随动系统，其状态和测量方程为

$$\dot{X} = Ax + Bu + Ew$$

$$Y = Cx + Du + Fw$$

$$\text{误差 } e \triangleq Y - Y_{ref}$$

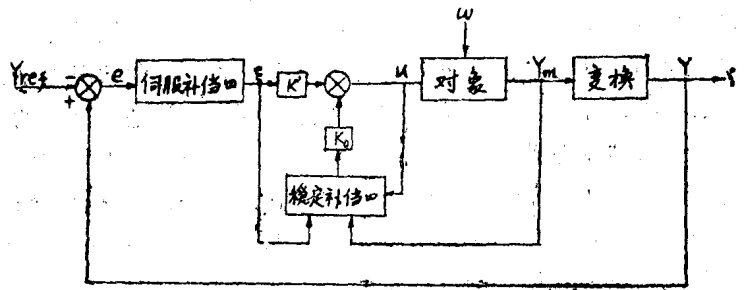


图2-1 鲁棒调节器 (Robust Controller)

如果干扰矢量 w 是一个具有已知或未知初始条件的线性能观系统的观测矢量，输入矢量 Y_{ref} 是一个已知初始条件的线性能观系统的观测矢量，那么，在一定条件下，存在一个鲁棒调节器，其结构如图2.1所示。其中伺服补偿器的结构形式为

$$\dot{\xi} = C^* \xi + B^* e$$

C^* 和 B^* 可由矩阵 (C, A, B, D) 的特性算出。如果稳定补偿器采用简单的互补补偿器，即

$$\dot{\hat{X}} = A \hat{X} + Bu$$

那么放大倍数 K 和 K_0 可以由扩展了的能控系统从极点配置，模理论等现代多变量线性系统的镇定方法求得。

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ B^*C & C^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \xi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ B^*D \end{bmatrix} u, \quad u = (K_0, K) \begin{bmatrix} X \\ \xi \end{bmatrix}$$

$$Y = (C \ 0) \begin{bmatrix} X \\ \xi \end{bmatrix} + Du$$

所谓控制中的代数方法（有时也叫几何方法）是由Brockett开始，把数学中的李群理论应用到控制中来。当系统的状态变量的变化范围并不构成有限或无限线性空间时，一般能控性和能观性问题的求解便很困难。Brockett^[36·1]用Volterra级的展开分析能展开性、能控性和能观性。目前还处于理论探索阶段。

一个值得注意的问题是线性多变量系统的去心控制^[43·3]。对于联合能控、能观的 K 路线性系统的闭路特性去心反馈后的影响进行研究。路间相互作用可以用合适地定义的指向图来描述。文章给出了 k 路线性系统去心控制的稳定性条件。

对于非线性滤波问题，这次会议并没有出现比已有的近似递推滤波更为优越的算法。Akashi和Kumamoto^[29·2]提出了用随机采样的办法进行状态估算，据说效果比推广了的卡尔曼滤波要好得多；但是他们的方法是针对一种特定的噪声模型（即马尔可夫相关统计性质）而言的，对于一般工程系统是否适用，值得研究。

在随机控制方面，前几年对线性二次高斯系统的最优随机控制问题得到了完全的解决后，面临的问题是线性系统非二次指标的最优随机控制、非线性系统的分离原则问题等。但这次会议上没有讨论这些问题的论文。

稳定性问题近几年来国外主要在研究由许多个相互之间有联系的子系统组成的大系统的稳定性；这些子系统除集中参数系统外，还可以是时滞系统和分布参数系统。分析这种大规模系统的稳定性问题在工程设计中是十分重要的。直接应用古典的李亚普诺夫方法来研究这

类复杂系统的稳定性是困难的，甚至可以说是几乎不可能的。六十年代初期，贝尔曼提出矢量李亚普诺夫函数的概念，不少作者用这种方法来研究大系统的稳定性。整个系统的稳定性问题是在子系统的状态空间的乘积空间上考虑的。但是在实际应用这些方法时还存在不少困难；因为这些方法都要求知道各个子系统的稳定性状况而子系统中可能有时滞系统，有分布参数系统，并且某些子系统完全的特征可能事前是不知道的，因此各个子系统的稳定性问题难于用古典李亚普诺夫函数方法来处理，作为在其乘积空间上定义的大系统的稳定性问题就更难于处理了。Tokumara等^[44·4]绕过上述困难，提出所谓互相联系的系统的宏观稳定性概念 (macroscopic stability)。如果时间趋于无穷大时子系统的输出都趋于零，那末就说系统宏观地是渐近稳定的。从这个概念出发，使用微分不等式工具，得到判别这类稳定性的准则，便于实际应用。

对于一类特殊结构非线性系统的波波夫稳定性判据，已经由许多作者推广到包含有多个非线性特性的多输入输出系统，并且得到这类系统稳定性的判别准则。Blight 和 Mc Clamroch^[44·5]介绍了大规模非线性多回路系统借助于线性子系统的乃氏面和非线性子系统的肯定条件来说明的稳定判据。即使在子系统数目比较大时，这个方法计算也比较方便。

三、自动控制技术的应用

这次会议应用方面共开了十六次小组会，报告内容包括过程辨识、电力、冶金、石油化工等几个方面，内容如下。

(一) 过程 辨 识

所谓过程辨识，就是通过试验或运行数据来估算出控制对象的模型及其参数。由于很多生产过程的复杂性和随机性，应用理论关系来推导数学模型常常是不可能的或至多只能求得半经验模型，其参数仍必须由试验或实时运行数据来求得。国际自动控制联合会在67、70、73年曾召开了三次辨识和估算的专题会议。过去的工作大多研究了单输入/单输出系统的问题。对于多变量线性系统来说，一般先决定一些单独的传递函数，然后建立状态空间模型；或者假定模型是已知的，用推广了的递推最小二乘状态估算方法在状态空间中包括系统参数，然后与其他状态变量一起估算。由于系统中的噪声和递推方程的收敛问题，经验证明，即使是低阶次的系统，这些方法都存在一些问题。

在工业生产过程中，锅炉的数学模型及其参数的测定已经比较好的解决^[2·2]，即使是比较复杂的电力系统，用已有的方法也能得到一些近似模型^[31·2]；轧钢机的数学模型比较容易推算；因此对于这些对象应用现代控制理论进行计算机控制进展比较快。但是化工过程的数学模型，无论从理论上和实践上都不易求得，使实现计算机在线控制的发展较慢。这次会议将过程辨识的十二篇论文安排在自动化应用的小组讨论会内，而实际内容大多数是研究辨识的理论方法，说明过程辨识在自动控制技术应用中的重要性。

加拿大Chintapelli等^[11·1]将73年Gavalas研究的参数估算法应用于一个中间工厂的两级蒸发器。这个对象的状态变量有十个，控制变量有三个，扰动变量有三个，输出变量有三个。这个方法的计算虽然比较简单，但不能实时应用于生产工厂，因为要求有一组当输入为

零, 系统从初始状态松弛的测量数据。

瑞典Söderström和Ljung^[18·1]讨论了线性多变量系统辨识中的准确度问题, 认为估算参数的准确度不但与辨识的对象有关, 而且与模型结构、辨识方法、和输入讯号有关。文章证明了对于闭环工作的系统来说, 在输出方差有约束的条件下, 如果选择较好的输入讯号, 闭环试验可以比开环试验取得更好的准确度。由于辨识问题是一个试验设计的问题, 选择输入讯号相当于选择试验的次数。东德Wernstadt和Hoffmeyer-Zlotnik^[11·5]用最佳多因子试验设计来辨识线性动态多变量系统的脉冲响应函数, 其格点的估算值方差比用足够的伪随机二进制讯号时要小50%。

对于单输入/单输出线性系统的在线辨识问题, 西德Kurz和Iserman^[11·3]介绍了在闭环运行状态下基于相关分析和最小二乘参数估计的计算方法, 可能有些实用意义。

对于非线性系统的辨识问题, 象化学反应过程, 一般将非线性滤波法推广应用于参数估计; 但计算量大, 并且当一个以上参数有非线性关系时, 存在缓慢收敛或不收敛, 甚至收敛到不相干的极值等问题。英国McGreavy和Gill^[11·2]讨论了一个简单放热反应器



的参数估算问题, 其中反应率

$$k = k_0 e^{-\frac{E}{kT}}$$

是温度 T 的函数。测量值为 T , 要求估算 k_0 和活化能 E 。采用的方法叫交变参数估算法, 就是在每一个采样周期, 固定一个参数, 估算另一个参数。例如在第一个采样周期 E 假定不变, 用平均值线性化滤波器来从输出温度 T 估算 C_A 和 T 以及常数 k_0 ; 第二个采样周期, k_0 假定不变, 估算 C_A 和 T 以及活化能 E_0 , 显然这个方法要推广到更复杂的系统是很困难的。

过程辨识方法广泛应用于工业对象、水源系统和环境系统的模型建立, 分别在这次会议的有关分组报告中有所反映。过程辨识方法也应用于生物工程和医疗卫生方面, 对于预防、诊断、和治疗都有一定的意义。比较成熟的模型和测试方法有动脉、心电、肾脏分离、药物麻醉、人机系统等; 这次会议中也有关于肺部呼吸^[54·2]^[54·3]、心脏收缩^[54·4]和血压^[11·5]^[54·5]的模型辨识工作。由于生物系统的高度复杂性、由多种因子所影响、且有多级结构, 目前取得的结果还是很有限的。

(二) 电 力 工 业

对电力工业方面自动控制的应用论文共有二十六篇, 其中核电厂方面六篇、电力控制中心方面十篇, 其他水电厂及电力网系统方面有十篇。由于计算机的广泛应用, 对自动控制的研究和试验工作有了很大的推动作用。研究了各种方法对系统模型进行辨识, 用来保证系统的稳定运行, 有一定参考价值。现将这方面情况简述如下:

1. 核电厂方面

(1) 由于目前在国外供电系统中核电厂的发展比重愈来愈大, 现在商业上应用多数的还是技术比较成熟的压水堆和沸水堆。也有少数的气冷堆、重水堆以及其他改型的堆。目前还正在发展高温气冷堆, 快中子增殖堆等。在这次会上西德与美国合作报告关于高温气冷反

应堆电厂的自动控制^(10.1)。法国报告了钠冷却快中子增殖堆电厂的自动控制^(10.2)。这两种反应堆都在进行商业应用的工程设计阶段。法国的钠冷却快中子增殖堆电厂，其商业名为超凤凰堆，热功率3000兆瓦，电功率1200兆瓦，将于1980年投产。其控制线路采用固体逻辑元件，TCI数据处理系统和彩色电视屏显示。其冷却辅助系统采用TRTC计算机巡检测量，反应堆使用诊断计算机，经过测量数据进行处理分析，包括噪声分析，可及时测得事故苗子，对其安全运行有很大帮助。此外对钠溶液有超声液位测量、钠中含氢量测定等等。但这个堆还没有用计算机作在线控制。

对于计算机作为反应堆的在线控制用，目前仍处于试验阶段；如加拿大别克林（Pickering）重水堆电站和美国Babcock和Wilcox公司正在研究用微型计算机在1000瓩的水池堆上作DDC控制试验^(20.5)。此外加拿大Sinha等^(50.6)研究了核反应堆的适应控制。

(2) 核电厂的自动控制主要是反应堆反应性的稳定控制和核蒸气供应系统（Nuclear Steam Supply System简称NSSS）的运行控制。两者又有互相影响的复杂关系。对反应性的控制，如压水堆虽已运行多年，但还存在一定问题。主要是负荷需要量变化时，由于堆内功率分布变化，要对中子通量进行调节。但是反应堆内功率分布是一个非线性数学物理模型。过去只用线性化来处理，西德Stark^(10.4)提出一个新的方法，将非线性模型展开为傅氏级数，取其三项系数组成控制系统如图3—1所示。这样组成的控制系统模型可以得到很好的调节效果；若采用一个傅氏系数组成控制系统，只能调节40~50%的中子通量变化。对反应堆内参数非线性的轨迹变化，法国Pages Fita^(10.5)介绍使用递推非线性估算方法，有参考价值。

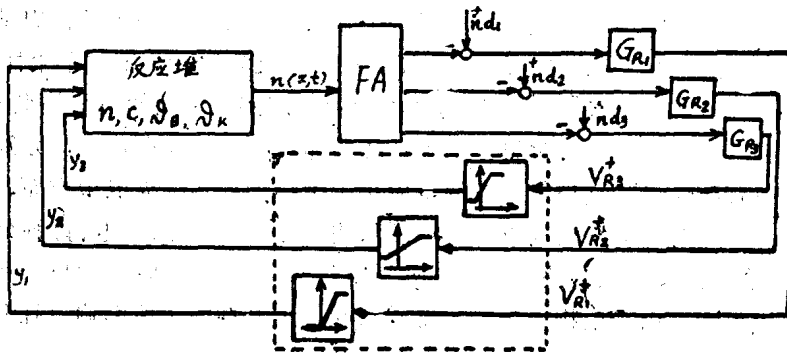


图 3—1

V_R ——控制量， y ——控制棒位置， n_d^+ ——需要值，FA——傅氏分析，C——缓发中子， θ_K ——冷却剂温度， n ——中子通量， θ_B ——元件温度， G_R ——控制器转换器。

关于NSSS系统的调节控制，包括反应堆冷却剂回路系统、蒸气发生器回路系统以及给水加热站等控制，对保证核电厂的负荷调节稳定运行极为重要，法国Larminaur^(10.3)从1970年开始用混合模拟机对压水堆核电厂的NSSS系统做两种模型研究（单回路与双回路系统），并对中子动力学、元件的热动力学、堆冷却剂系统热流学、压力容器、回路泵、蒸气发生器等提出数学计算公式与试验模型。文章介绍了在现场进行试验来验证其模型的情况。

(3) 关于核电厂的自动控制与安全要求，美国西屋公司有篇报告^(50.6)。过去六到八年间对压水堆核电厂控制系统的设计要求都以一般发电厂相类似，即要求负荷变化接近于常数。安全设计要求都按照美国IEEE-279的规定。他们认为这样考虑还不够完整。因为堆内元件燃烧与氙的产生及衰变过程有关，也与包括慢化剂的水温，元件温度、控制棒的位置与

硼溶液的浓度等因素有关。其中对温度的负反应性系数，在系统中起着自平衡调节性能的作用。这些热惯性的响应都是缓慢的，如图3—2所示。对控制系统的要求允许负荷变化范围15%

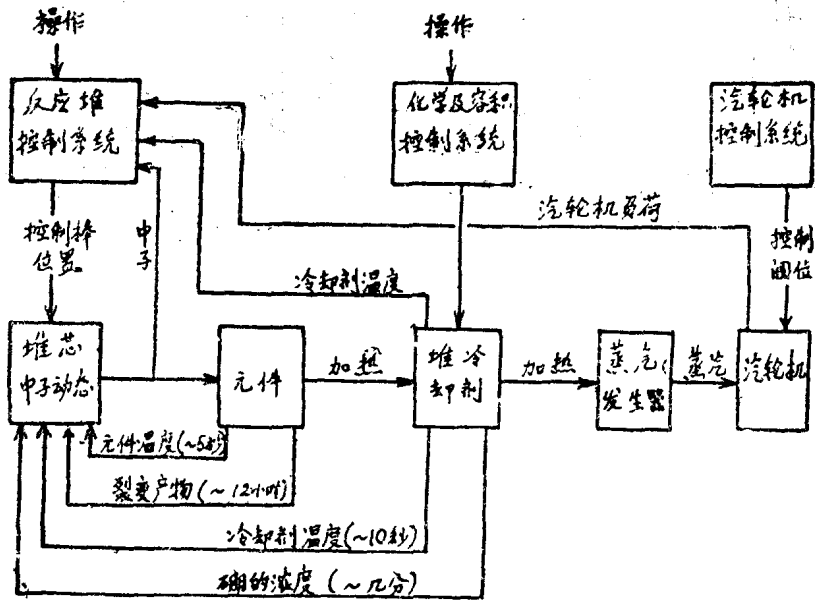


图 3—2

到100%功率内，按±10%阶梯负荷变化，变化速率每分钟5%调节，在15%负荷以下运用可以采用手动控制。报告认为安全保护系统中应考虑一次仪表敏感元件输出可以既作保护系统的讯号，又作为控制调节系统的讯号，反对用分开的一次仪表，这样既经济又安全。当然对保护系统的讯号应采用四中取二的方案，控制系统的多路同类讯号采用平均讯号挑选法 (auctioneered) 作为实际控制讯号值。对一次仪表的质量要求比较严格，其误差应保证在公差范围内，使保护系统不会误动作。

为了达到调节功率分布的要求，西屋公司设计了部份吸收控制棒与全部吸收控制棒，使轴向功率分布调节均匀，既能输出最大功率，又满足安全原则；系统设计的限制条件为：

- (1) 失掉冷却剂的功率密度限制 (LOCA)。
- (2) 瞬时核沸腾点限制 (Departure from nucleate boiling) —— 不要达到损坏元件包壳的温度。
- (3) 线性功率梯度的限制 (Kw/ft) —— 保证元件包壳的应力与张力在限度以内。
- (4) 防止元件的烧结。

这些条件的轴向关系如图3—3所示。根据这些要求设计部份吸收控制棒与全部吸收控制棒使其控制功率在不同工况下达到图3—4的要求。其轴向功率分布平均，对二十四小时内外界负荷变化时都能安全控制运行。

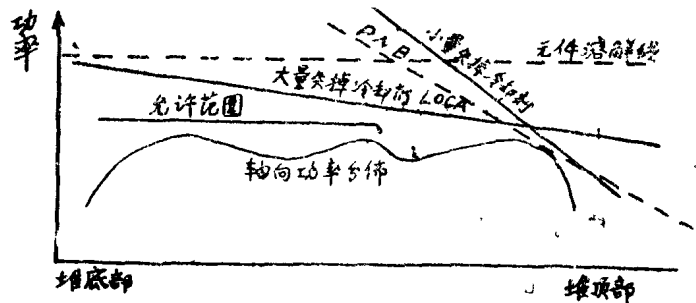


图 3—3

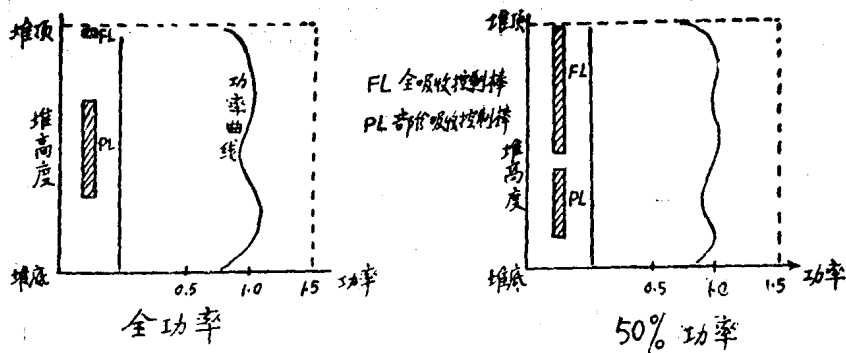


图 3-4

2. 电力系统与一般电厂的自动控制

有关电力系统与一般电厂自动控制的论文共有十篇。应用过程辨识方法来解决自动化问题的报告比较多。例如奥地利Romberg^(2·1)对发电厂中沸水通道的动态热量转换分析,使用一个理论模型,与噪声分析法结合起来比较,得到精确的估计值,从而了解其动态特性和冷却水流量稳定性。对工程设计提供更符合实际的数据。又如英国Sutherland等^(2·2)应用相关技术去辨识锅炉的动态特性,适合于现场应用。他们采用伪随机二进位讯号方法来辨识带有高噪声系统的动态特性。在文章中介绍如何决定试验条件,如何选择试验讯号参数,如何在开环与闭环回路试验以及分析数据。曾在英国Ferrybridge C发电厂的一台500MW机组上进行试验,对象包括给水系统、过热蒸气温度系统、过热蒸气压力控制系统等。美国Masiello和Schweppe^(31·1)介绍了在电力系统中采用辨识方法来解决调节器的设计问题。他们的方法分为四个步骤:(1)先在工程系统中假设一个低阶次的相似模型。(2)输入未知参数到辨识模型中,从中得到数据与实际系统数据进行分析研究。(3)对辨识模型设计一个线性调节器进行控制达到系统稳定。(4)不断往复试验来得到数据,最后求得稳定控制结构。这个方法特别适用于高阶次多路输入—多路输出已知结构的电力系统模型。意大利Canuto等^(31·2)在意大利电力网上试验三种辨识方法,进行比较。它们是(1)频谱密度估算和处理。(2)直接应用测量样本的最大似然判据。(3)扩展了的卡尔曼滤波。又如加拿大Panuska等^(31·4)用二步随机相似方法短期预测电力系统负荷变化的模型,使电力调度管理部门能统一安排负荷。考虑到天气变化对供热的影响,他们将模型参数分两步去辨识:第一,先计算剩余分量(Residual Component),接着第二步计算周期正常负荷分量(Periodic nominal load Component)。每个分量都用递推最小平方随机近似算法计算。使用CDC6200计算机,存储容量为26000到37000bytes。他们认为计算速度还不够快,正在研究改进中。

3. 电力控制中心的自动化

这方面的论文共有十篇。目前在资本主义国家中,为了合理使用电力负荷和经济效率,方便运行人员的管理与操作,使用计算机集中控制的规模愈来愈大。例如美国东海岸宾雪凡尼亚、新泽西和马利兰三个州的电力联接起来加以集中控制^(17·1),系统管理十二万二千平方公里的面积,包括120个电厂,水力、火力和原子能发电机组555台,总发电量42283MW,

高压输电线有8700公里。该电力控制中心使用两台IBM-370计算机双机运行,在1.5到3秒内可以获得全系统各公司、厂、站的数据情况又如美国休斯顿电力公司的控制中心^[17.2]在1971年11月投入使用,使用两台SIGMS-5计算机双机运行。由计算机控制显示的大型电网系统图大小为22呎×50呎。该电力中心管理三百个电厂,可接收一万个输入模拟讯号和五千个包括线路断路,操作记数、自动合闸、各种警报等状态讯号。对状态讯号、电力输送和负荷分配等情况进行周期巡测和记录显示。此外,还对空气和水等环境污染进行控制,对油料输送管线进行控制。

电力控制中心也有使用多计算机系统来保证可靠性的,如日本的Hokuriku电力公司^[24.4]使用三台计算机,其中一台是主机,一台用于负荷频率控制,另一台用作前端计算机(Front-end Computer);不但加强了硬件的可靠性,也在软件的观点上加强了在线安全可靠。显示器中,英国介绍了四色示波管屏幕,在同一点上由于电子束控制电压不一样,得出红、橙、黄、绿四种颜色,组成白色显示图。

(三) 冶金工业

1. 选矿

选矿方面文章共五篇。选矿的自动化程度不算很高,如73年时某选镍矿的厂只用了比例积分控制逻辑和监视装置,还没有直接数字控制^[60.2]。一些静态、动态数学模型都没有达到实用阶段。有的研究了选矿最优控制的一些数学模型^[60.3],但还没有到生产厂做模拟试验。目前阶段计算机虽已开始应用,但多是在给定某几个变量的条件下计算如何能使某一函数(例如代表矿石有效成份)为最大。有人认为选矿厂用计算机的存储部件以磁心和固定头磁盘较为可靠^[60.2]。

今后的工作动向有:①确定生产过程中哪些变量起主要作用,②发展有效的反馈控制方法,③采用计算机作数据的收集、处理、分析、储存,为进一步工作做准备,④有些附属的生产过程,目前最有效的是加前馈控制回路,如pH参数^[60.2],⑤采用闭路系统以校正数学模型。有的厂^[60.5]在采取③—④的措施后,选矿后的含量可提高1.3%。

2. 高炉

高炉控制有二篇文章。高炉的静态控制已经成功,但动态控制方面近年来进展很不明显。虽然71年以来为动态控制研究了一些检测元件,部份解决了热分布、气体分布的问题,但总的说来,仍处于初始的研究阶段。仍有人在设法从炉内实际的化学和物理过程研究动态模型,看来困难是不少的。

目前的动向是利用过去积累(现在仍继续积累)的运行数据来建立统计模型。有的人把因素分析(FACTOR ANALYSIS)的办法用来分析高炉生产。每个因素是若干个变量的函数。变量的选择要恰当,例如^[39.2]认为22个变量已足够,代表中等程度的变化,组成了五个因素进行分析,找到了高炉情况与因素分数(FACTOR SCORES)的一些关系。下一步的工作是:①找出一个能表示高炉生产好坏的定量指标(PERFORMANCE INDEX),②找出该定量指标和所选因素分数的关系,③因素分数的控制问题,包括高炉不稳定现象和因素分数的关系,因素分数的低频漂移、高频噪声、中频变化等。