编　号：(78)027　　　　内部

出国参观考察报告

国外自动控制

科学技术文献出版社

出国参观考察报告
国外自动控制
（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787×1092·$\frac{1}{16}$ 8.25印张　208千字
科技新书目
统一书号：17176·174　　定价：0.90元
1979年5月出版　　印数：22,000册

国 外 自 动 控 制

参加国际自动控制会议代表团

前　　言

这份报告记述了国际自动控制联合会（IFAC）第七届世界大会及成员国代表大会的概况，并根据会上宣读的论文和会议前后参观访问法国、芬兰、荷兰情况，提出了我们对国外自动控制发展动向的一些看法。考察报告的重点放在理论、应用（自动控制技术在生产过程中的应用）、计算机和空间四个方面，此外根据实际考察的收获，报告中还包括了对高等教育和系统仿真方面的内容。

由于我们的水平所限，报告中难免有错误、不当之处，請批评指正。

一、概　　况

本届国际自动控制联合会（以下简称IFAC）世界大会于78年6月12日至16日在芬兰赫尔辛基召开。参加这次大会的有三十七个国家（包括非会员国伊拉克、爱尔兰），共一千一百多名代表，其中东道国芬兰182人、美国117人、苏联87人、瑞典74人、荷兰60人、日本53人、法国51人、英国51人、捷克49人。我国代表团为12人。6月12日大会开幕时，由芬兰总统吉科宁致开幕词，然后由本届IFAC主席罗托作会务报告。罗托介绍了他任期三年中的主要活动，共组织了三十五次讨论会和工作会，报告论文共1400多篇，参加人数为一万多人次。

这次大会，共收到论文七百五十多篇，经会议议程委员会安排了三百多篇论文在60个小组会上宣读，举行了四次全体会议作综述报告，此外还组织了五个方面的工程专题报告和十六个圆桌讨论会。从论文的专业看，包括有理论69篇、控制数学39篇、应用58篇、系统工程45篇、计算机21篇、空间20篇、生物医学12篇、元件10篇、经济管理8篇等。提出论文较多的国家有美国68篇、苏联40篇、日本25篇、法国20篇、英国20篇、西德18篇、芬兰12篇、意大利12篇、瑞典8篇、丹麦7篇、波兰7篇等。我代表团陈翰馥同志在控制数学小组会上宣读了“随机能观性和能控性”的一篇论文。

会议期间召开了成员国代表大会，到会的成员国有三十三个，保加利亚、古巴、希腊、朝鲜、西班牙、罗马尼亚未到会。会上由主席罗托报告了执行委员会的工作，名誉司库寇诺（Cuénod）的代表作了财务情况的报告。会上通过了接纳摩洛哥为会员国。对执行委员会的改选，由于沒有人提出新的候选人，采取一攬子举手方式选举产生。根据出国前预定方针，对上述两次表决，我代表团均举手同意。在有关专业委员会活动中，我代表团派人列席了计算机、空间、理论和发展中国家等专业委员会会议，了解了今后的活动计划。目前在IFAC中共有十四个专业委员会，主要作用是推动国际学术交流和组织评选会议论文的工作。

在大会结束后，我代表团派出两名代表参加了由IFAC和IFIP（国际信息处理联合会）在爱兰岛联合召开的计算机实时软件工作会议，进一步了解了当前应用软件中实时软件的发展和各国协作情况。

六月十六日下午大会闭幕式，由第二副主席西德托马（Thoma）作总结报告。他提出今后计算机将更广泛地应用于生产过程控制，多机控制和多级控制将是主要发展趋向。最后由日本椿木教授接受会旗正式接任新的一届（第八届）自控联主席。

在会议期间及会后，代表团在芬兰赫尔辛基等地参观访问了十四个单位。赴芬前，在法国巴黎和图鲁兹参观访问了十七个单位。离芬后，又应荷兰教育科研部的邀請在荷兰参观访问了九个单位。最后在归国途中，在罗马尼亚计算机厂（ICE）参观了两天。在以上四十一个单位的参观访问中，计有科研单位八个、工业企业二十四个、八所高等院校和一个医疗中心。参观访问纪要，将在本报告中附及。

二、自动控制理论

(一)系统理论

本届IFAC大会理论方面的论文较多地集中在系统理论方面。照论文集粗略的分类，这部分内容包括26A，26B，41，42，43A，43B共30余篇论文，比较集中的研究课题有系统的稳定性与强壮性、能控性、能观测性以及系统的综合问题，其中包括用于定常系统的综合的几何理论。

1．近二十年来控制理论用状态变量的办法得到蓬勃发展，这时期内出版的论文，占压倒多数都用状态变量来描述系统。尽管状态变量法对时变系统和非线性系统有它独到的好处，但对定常系统来讲，状态变量法和频率法却是各有其优缺点的。因此有一些作者致力于研究两种方法之间的关系。

（43A．1）讨论下列问题：a）给定系统（A，B）及初值$x(0)=x_0$，频率S_0，问在什么条件下，输入$u(t)$造成输出$e^{s_0t}x_0$，$\forall t\geqslant 0$，或$\forall t>0$？b）在什么条件下，以0为初值的系统（A，B）具有轨线$e^{At}x_0$？c）给定系统（A，B，C），输入恒为0，要找P及x_0，使状态和量测分别为

$$x(t)=1(t)e^{pt}x_0,\ y(t)=1(t)e^{pt}y_0,$$

d）给定系统（A，B，C），找z及x_0使输出$y(t)\equiv 0$，而输入及状态分别为$u(t)=1(t)e^{zt}u_0$，$x(t)=1(t)e^{zt}x_0$。该文用代数中的矩阵束为工具，用状态空间法和频率语言分别对上述诸问题作了答案，表明了状态变量法和频率法之间的联系。

2．线性多变量控制系统的几何状态空间理论是近几年发展起来的，它的主要目的是用来解决线性多变量定常系统的综合问题。矩阵代数是研究线性定常系统的有力工具，但矩阵可看成是抽象算子的具体表达，而算子的几何性质已有成熟的理论，因此用几何方法研究线性定常系统是完全可行的。由于算子和空间结构有着紧密的联系，这种联系应用于线性系统，就是算子与状态空间的关系。

几何理论中的两个最基本的概念就是（A，B）一不变子空间和（A，B）——能控子空

间。所谓$(A,\ B)$——不变子空间是指基本空间X的子空间V，它满足条件$AV\subset V+B$，这里B是B的值域空间。而(A,B)一能控性子空间是指这样的$R\subset X$，对它能找到F及G，使

$$R=\langle A+BF/I_m(BG)\rangle,$$

这里$\langle A/B\rangle=B+AB+\cdots\cdots+A^{n-1}B$

可以证明，V是$(A,\ B)$——不变子空间的充要条件是存在F，使$(A+BF)V\subset V$。这样就把状态反馈和空间结构联系在一起了，所以研究(A,B)——不变子空间的性质导致解决系统的许多综合问题，例如干扰解耦问题，输出镇定问题。

设R是维数为P的子空间，$R\subset X$，R为能控性子空间的充要条件是1）R为$(A,\ B)$——不变子空间；2）对任意P个复数组成的对称集$\wedge$，存在F，使$(A+BF)R\subset R$，并且$\sigma(A+BF/R)=\wedge$，利用这个事实，我们就看到极点配置问题和能控性子空间紧密地联系在一起的。

应用几何理论，近年来在输出解耦问题（使输出不受干扰影响）、从结构稳定性的角度研究伺服调节器问题、模型匹配问题、分级控制等问题上已取得不少进展。

（43A.2）对几何理论作了一个很好的介绍。

（41.6）对离散时间的线性系统定义了不灵敏的观测器，并用几何方法，得到了使这种性质成立的充分必要条件。在（26A.2）中用代数方法对单输入单输出系统建立了传递多项式（见Morse, SIAMJ on Control, Aug. 1973）和$(A,\ B)$—不变子空间等几何概念之联系。

3．强壮性（Robustness）和稳定性。系统的强壮性表示系统的品质不受系统结构或参数在一定范围内变化影响的一种特性，近年来这个概念受到较多的注意。但是从本届IFAC大会看，从理论上讨论强壮性的文章并不多，对稳定性却有较多的讨论。

对线性定常系统，线性二次调节器设计产生稳定的反馈系统。（43A.4）讨论系统系数可作怎样的变化，使得根据原系统设计的二次调节器仍是稳定的？该文给出了充分条件。

（26B.2）讨论非线性系统的绝对稳定性问题。设$\phi_{ij}(y)y>0$，$y\neq 0$，$\phi_{ij}(0)=0$，如果和阵$A=\{a_{ij}\}$的元的符号相同的任一阵都稳定，那么称系统$\dot{x}_i=\sum_{j=1}^{n}a_{ij}\phi_{ij}(x_j)$，$i=1$，……，$n$具有符号稳定结构，如果$A$阵同时又是约可皮阵，那么称系统具有约可皮符号稳定结构。本文给出了使系统

$$\dot{x}=Ax+b\phi(y),\quad y=cx$$

大范围绝对稳定的充分条件，它表达为要求一个由系统系数所组成的阵具有约可皮符号稳定结构。

（42.2）给出了一类线性系统所应具有的结构，使得加上一个非线性反馈后，所得到的闭环系统在Hurwitz角$(o,\ k)$内是绝对稳定的，当然对所加的非线性反馈有一定限制：要求它具有平稳特征$\xi=\varphi(\sigma)$，并且$o<\dfrac{\varphi(\sigma)}{\sigma}<k$，　$o<\dfrac{d\varphi(\sigma)}{d\sigma}<k$

（42.5）讨论一类采样控制系统是否存在给定周期的极限环问题。所考察的系统是经过量化的。本文用代数方法给出了存在极限环的必要条件。当系统的非线性为输入的限制器时，把非线性自治系统化为线性非自治系统，给出了不存在极限环的判据。

（41.5）用Ляпунов方法，考察在存储环中高能量电子碰撞束（一个带白噪声的二阶系统）

的稳定性问题。Ляпунов方法在（26B.3）被用来研究带时滞的经济系统的随机稳定性，讨论的对象是多品种社会（multispecies community）的稳定性，稳定条件表达为社会阵的对角线元的被控制性。

如果系统的特征频率全部在对称于负实轴的锐角扇形内，那么称系统为相对稳定的。（26B.6）用Schwarz-Christoffel变换，给出了判别多项式根集中在扇形内的简化准则。

4．能控性和能观测性。自从六十年代Kalman提出这两个概念以来，充分显示了它们对线性控制系统的重要性，至今仍不断地受到研究。

（37.20）讨论离散时间线性系统当控制作用是非负值时的能控性问题，文中给出了使系统完全能控的充分必要条件。

（41.3）讨论能控性和能观测性指标问题。在能控阵$[B\ AB\ A^2B\cdots\cdots]$中只保留和前面独立的列，如果$B$的第$j$列左乘$A$阵的最高幂次为$\lambda_j-1$，那么$\lambda_j$称为$B$的第$j$列的能控性指标。同样可以定义系统的能观测性指标。如果能控阵（或能观测阵）为首的几列（行）是线性独立的，那么称为"类属"（generic）情形。一个非类属系统，总可用并联办法结合上一个辅助系统，使联合系统成为类属的。辅助系统的阶数最多不超过$(l-1)(n-l-1)$（或$(m-1)(n-m-1)$），这里$n=\mathrm{rank}A$，$l=\mathrm{rank}B$，$m=\mathrm{rank}C$，并且串联和反馈都无助于减少辅助系统的阶数。从连续系统离散化得来的离散系统，其能控和能观测指标未必和原来的连续系统一样，但如果采样间隔很小的话，那么两者是接近的。

当连续时间系统（A、B、C）为完全能控时，用λ_i表示A的本征值，如对一切满足$\mathrm{Re}\lambda_i=\mathrm{Re}\lambda_j$的本征值采样间隔$T$满足条件

$$I_m[\lambda_i-\lambda_j]\neq\frac{2\pi l}{T},\quad l=\pm1,\ \pm2,\ \cdots\cdots,$$

那么用基本解阵以T为步长离散化所得的离散化系统也是完全能控的，这是已知的结果（见R.E. Kalman等,Contr. to Diff. Equs. V.1)。

（41.4）中证明，如T满足上述条件，那么若用P_i表示第i个素数，则$\{TP_1,\ TP_2,\cdots\cdots\}$中有穷子集都满足上述条件。因此当以$T$为周期采样所得的离散系统为能控时，我们可以从$\{T,\ 2T,\ 3T,\ 5T,\ 7T,\ 11T,\ \cdots\cdots\}$（个数最多不超过$\frac{n(n-1)}{2}$，$n$为状态空间的维数）选取较长的采样步长，使离散系统仍保持能控性，这对使用一个计算机同时控制多个系统是十分重要的。

（26B.5）给出了受干扰线性系统的强壮性的一个定义，它是指系统的传递函数$H(\tau)$受到满足$|\delta H|\leqslant\delta H_{max}$条件的任意干扰$\delta H$时，实际输出偏离所希望的输出可以局限在一定范围内。实际上这是能达性定义的一个推广，因为当$\delta H_{max}=0$时，这里定义的强壮系统就是一个能达系统。该文给出了使系统强壮的充要条件，并且把强壮问题化为一个对偶的控制问题。

（26B.4）对随机系统给出了随机能观测和随机能控性的定义，当系统退化为确定性系统时，该文给出的随机能控和随机能观测性就成了确定性系统的完全能控和完全能观测性了。该文给出了使系统随机能观测和随机能控的充分必要条件，同时还表明了用量测量对状态量作不用初始统计特性的线性无偏最小方差估计和随机能观测性之间的紧密联系。

5．系统综合。（43B.2）讨论在平稳过程V干扰下，定常系统的反馈控制综合问题：

$$Y(s)=P(s)U(s)+P_0(s)V(s),$$

$P(s)$和$P_0(s)$是给定的多项式，要求找$R(s)$，

$$U(s) = -R(s)Y(s),$$

使闭环系统渐近稳定，并且使输入和输出的稳态方差的加权为最小。该文给出了存在最优控制的充要条件，并且当条件成立时，给出了最优控制的形式，并举有实例。

(43B.3) 讨论多维离散时间调节器的综合。

(43B.4) 讨论参数控制作用下的输出调节器，它所讨论的系统为：

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + \sum_{i=1}^{p} N_i U_i(t) x(t) + Bv(t) + Md(t),$$
$$y(t) = Cx(t) + DV(t) + Ld(t)$$

$V(t)$ 是加性控制，$U_i(t)$ 是参数控制（或乘性控制），要求 a）闭环系统指数衰减；b)在常干扰下，闭环输出趋于 0；c）在常干扰下，闭环系统的状态趋于常值。该文给出了使这些性质成立的充分必要条件。由于证明是构造性的，所以证明过程实际上也构造出了参数控制。

(42.4)讨论指标为$\int_t^{t+T} U^\tau R u ds$的线性系统，这里$T$是常数，$t$是流动时间。文中证明在$t$时的最优控制为

$$U(t) = -R^{-1}B^\tau W^{-1}(T)x(t),$$

这里$W(T)$是Ляпунов方程

$$\dot{W} = -AW - WA^\tau + BR^{-1}B^\tau, \quad W(0) = 0$$

的解在T时刻的值。这种办法的优点在于要选取的参数只有R和T，并且不用解Riccati方程，所以节省了计算时间。文中还讨论了加上不同限制条件所得的渐近稳定控制器。

(41.1) 讨论模型匹配问题中最低阶的稳定解。在$T_1(s)T(s) = T_2(s)$中，T_1和T_2已给定，要找稳定的最低阶数的T。该文给出了找T的具体算法。

(42.1)讨论极点配置的类属性质，文中给出了必要条件。

6．其它。(26A．1) 用李代数和李括号等数学工具，找到了非线性系统的不变量，它描述了控制系统本质非线性的程度，所谓本质非线性是指不能用反馈补偿来抵销的非线性。

在控制理论中，Ляпунов矩阵方程以及类似的矩阵方程有它的重要性，用数值积分的办法求解的计算量很大。(26A.3) 引进一种代数运算，可以求出这类方程的精确解。

求闭环反馈系数阵，使闭环传递函数有指定性质，就要解阵多项式方程：

$$A(s)X(s) + Y(s)B(s) = C(s)$$

(26A.5) 讨论这类方程的解（$X(s)$，$Y(s)$）的结构及算法。

(42.4) 给出了计算在继电系统中的多脉冲振荡方法，其中必须解一个非线性代数方程，为此用Fortran语言编了程序。本文结果可用于卫星姿态控制的研究。

(二) 随　机　系　统

1．近年来在国际上小型和微型计算机的蓬勃发展，开始影响到滤波方法的研究。已有一些人开始研究适用于在小型计算机上平行计算的滤波方法。

(49A.1) 讨论了下列非线性方程的滤波问题：

$$dx(t) = f(x,t)dt + g(x,t)db_1(t),$$
$$dZ(t) = H(x,t)dt + db_2(t),$$

b_1和b_2是独立的布朗运动。

用$P(x,t)$表示在（$Z(\tau)$，$\tau\leqslant t$）条件下$x(t)$的条件密度，那么

$$P(x,t)=\frac{\widetilde{P}(x,t)}{\int_{R^n}\widetilde{P}(x,t)d\tau},$$

$\widetilde{P}(x,t)$叫非标准化密度，它满足以下方程：

$$d\widetilde{P}(x,t)+A(t)\widetilde{P}(x,t)dt=\widetilde{P}(x,t)H(x,t)dZ(t)$$

$A(t)$是Fokker—Planck算子。为了求上述密度方程的数值解，就要对时间变量和空间变量进行离散化。对固定的t，如果选取合适的基$\{\xi_i(x)\}$，那么存在$\{\lambda_i\}$，使

$$\widetilde{P}(x,\ t)=\sum_i\lambda_i\xi_i(x)$$

利用这个等式，就可以用小计算机，对不同的i，进行平行计算，以便算出$\widetilde{P}(x,t)$在时间上的差分。文章最后以实例说明，在噪声很高的情况下，推广的卡尔曼滤波往往发散以致不能实际应用，而最优非线性滤波是稳定的，并且所需计算量仅比推广的卡尔曼滤波大7—10倍。

（49A.5）讨论在系统中参数Θ能取的具体数值只是有穷个Θ_1，……，Θ_p的情形。设λ_k为量测量，对Θ的估计值为

$$\hat{\Theta}(k)=\sum_{j=1}^{p}\Theta_j f(\Theta_j/\lambda_k),$$

这里$f(\Theta_j/\lambda_k)$可用Bayes公式求出

$$f(\Theta_j/\lambda_k)=\frac{f(y_k/\Theta_j,\lambda_{k-1})f(\Theta_j/\lambda_{k-1})}{f(y_k/\lambda_{k-1})}$$

不同的Θ_j可用不同的小型计算机处理，平行地进行计算。文中举有用20个滤波器平行计算的实例。

2．各种新的滤波算法仍在不断探索中

（49A.4）讨论离散时间非线性系统的统计滤波器。统计滤波器的特点就是对概率密度的积分用有限个从具有该密度的总体中抽取的随机数来实现的。该文讨论不增加试验次数，而用递推地改善总体的办法来提高估计精度。计算结果表明，精度可以成倍地提高。

（49B.4）要求滤波值满足状态变量应满足的动态方程作为限制条件，同时要求估计误差的方差最小。但从这两个要求出发的滤波器计算比较复杂，因此同时研究了便于计算的次优滤波器。

（49A.3）讨论离散时间非线性方程的滤波问题，用Bayes方法得到验后密度的递推方程。具体计算时主要的计算量是要算一个非线性卷积。本文用基本样条函数的内插性能好又较简单这一特点，得到一种计算非线性卷积的办法，它的计算量小，但精度相当于用张量乘积方法所达到的精度。

（26B.4）讨论了状态初值统计特性未知时的线性无偏最小方差递推滤波问题，对离散时间和连续时间分别讨论了存在这种估计的充分必要条件。当此条件成立时，还得到了递推

滤波值的具体表达形式以及近似地得到这种估计值的办法。

3．随机系统中的参数估计问题，（49A.2）讨论连续时间非线性系统：

$$dx=f(x,a)dt+G(x,a)d\beta$$
$$dz=Hxdt+d\eta$$

a是未知参数。今对上述方程补上一个方程：

$$da=0,$$

然后用次优滤波器来估状态及参数a，用

$$P=\begin{bmatrix} P_x & P_{xa} \\ P_{xa} & P_a \end{bmatrix}$$

表示计算出来的估计误差协方差阵。在一定条件下可以证明，或者滤波发散（P不对称所导致），或者 $P_a \xrightarrow[t\to\infty]{} 0$，$P_{xa} \xrightarrow[t\to\infty]{} 0$。这时可以利用滤波值概率密度函数的Fokker-Plank方程去研究这些密度的依时间的发展情形。可以证明对拟线性方程，参数a估不出来。所以用次优滤波器去估参数是很不可靠的。但当维数较低时，把系统离散化后，用最优滤波器去估参数时，可能得到正确的参数估值。

（49B.2）讨论量测量为未知参数叠加噪声的情况，噪声密度为

$f(x)=(1-\alpha)p(x)+\alpha q(x)$，$0\leqslant\alpha\leqslant 1$，$p(x)$ 和α为已知，$q(x)$ 未知。在一定的性能指标下，如果所得到的估计不依赖于$q(x)$，那么估计就叫做强壮估计。本文用随机逼近的办法给出了能得到强壮估计的几个具体算法，这些估计对噪声分布的变化是低灵敏的。

（43A.5）讨论最可能改变系统性质的时刻的估计。由于观测值有上千个，因此用极大似然估计时，不得不求一个很大阵的逆阵。文中给出了使计算成为可能的一种算法。

4．随机控制方面较多的研究集中在大系统方面，例如（32A.1），（32A.2），（44.3），只有一篇文章（49B.5）涉及一般的随机系统的随机控制，它讨论二次指标下的离散时间系统，模型噪声是一个二阶随机过程。它用Bellman 方程求出了最优随机控制，并证明了等价原则。

（三）辨　识　方　法

1．根据输入、输出来确定随机过程数学模型方面，比较值得注意的有（45A.1）所讨论的估计参数和定出结构的办法。该文作者在1974年曾提出了一个信息准则（AIC）作为拟合劣度的测度：

AIC=$(-2)\ln$（极大似然函数）+ 2 × 拟合参数的数目。我们构造的概率密度$g(x)$ 和真正的概率密度$f(x)$ 的接近程度是用$f(x)$ 对$g(x)$ 的熵来表达

$B(f,\ g)=\int f(z)\ln g(z)dz-\int f(z)\ln f(z)dz$ 辨识过程就是要使 $E_xB(f,\ g)$ 达极大。通常的做法是给出几个g，也就是给出几个可供比较的模型，然后对每个模型用极大似然法估出参数，把估值代入 $\ln g$，比较所得值之大小，那个最大就采用那个模型。这个做法有一个缺点，就是$\ln g$对 $E\ln g$是一个有偏估计。因此作者提出，对参数作了极大似然估计后，去选g使AIC达最小，所得的分布作为对真正分布的估计。这个估计称为最小AIC估计。这样把参数和结构的估计结合在一起了。

自回归滑动平均混合模型中系数估计问题本来是一个非线性估计问题，计算量很大。

（45A.4）把这个系数估计问题转化成几个较简单的极值问题，得到对系数的线性估计，它是相容并且渐近有效的估计，而计算量又较小。但对多输入多输出系统类似的问题并沒有解決。

2．在辨识问题中，对线性模型除了最小二乘和回归方法有一个综述（45A.2）外，主要的注意力都集中在非线性系统的辨识问题上，其中（49B.3）讨论当扰动满足齐次线性微分方程时的非线性时变系统的参数估计问题。本文利用有限时间內的数据用最小二乘法给出了参数估计。（45A.5）讨论线性环节和非线性环节通过反馈或前馈闭合在一起的情形。如果非线性环节有逆，那么在原系统的逆系统中，线性和非线性环节不闭合在一起，所以进行具体识别时，识别原系统的逆系统比较简单。

（45B.1）对非线性系统的参数辨识问题定出了一个加权指标，这样辨识问题就归结为数学规划中所解决的求极值问题。用拟牛顿法结合数值积分，在一定条件下得到了以概率为1的相容估计。（45B.5）讨论描述刚体运动的非线性方程中的参数辨识问题，用类似随机逼近的办法估出了未知参数。（31.2）对单自由度陀螺用两轴滚翻试验，比以往用的试验有许多优点。把数据通过傅利叶变换转向频率域，然后用频率域数据压缩技术处理数据，然后定出9个陀螺参数。这个方法能减少试验设备和对试验要求。（45B.3）讨论在输入x条件下输出y的条件协方差不是常值时的辨识问题。（23—07）讨论分布参数系统的辨识，研究了辨识过程的收歛性，解的唯一性，还举有地下气化的实例。

（45B.5）列举了用辨识方法对生物系统、喷气发动机的诊断。受控飞机的在线辨识、多维工业系统等对象建立数学模型的实例。

（四）适　应　控　制

（46A.1）是适应算法的一篇综述。作者把最优化过程中的不确定性分为三类：一是作出决策的条件的不确定性，这包括对方程、外界干扰、自然限制等条件了解得不完全；二是要求的不确定，其中包括判决准则的不确定，这和前者不同，是主观的不确定性；第三方面的不确定性是解的随机性，这由于解的随机化或平滑等原因引起的。

作者认为适应性系统理论的发展经历了四个阶段。第一个阶段从1955年起，当时从直觉导出各种算法，然后证明它们的收歛性。这些算法当时并沒有促进模式识别、分类和辨识问题的解决；第二个阶段从1965年起，利用随机逼近技术，通过解极值问题，得到递推的适应性算法，它能使指标渐近地达到最优。这方面的算法主要是随机梯度型的。由于随机逼近算法收歛速度很慢，因此到达第三阶段，希望把整个适应过程最优化。各种适应算法的最优化的主要区别在于选择各种不同的增益阵。但最优过程有时不稳定，这就到达第四阶段，希望找到一个适应过程是稳定而强壮的。

文中简单介绍了适应算法的收歛性及收歛速度，适应算法的随机化和光滑，适应算法的最优化、强壮化及规律化。文章最后谈到适应算法的发展趋势，提出在有些最优化问题中，由于要求的不是最优解而是平均损失最小而产生的问题，提出利用验前知识的重要性，提出样条函数对构造模型起到重要作用的可能性，提出如何降低算法灵敏性等问题。

本届大会中有好几篇文章都谈到适应控制的各种方法中，最受注意的是模型参考系统和自调准调节器两种。前者也称直接方法，即调整控制参数，使受控系统的输出与所希望的参考模型之间的误差渐近于0。后者指估计未知的受控系统的参数和状态变量，并用这些来调

整控制器的参数。换句话说，后者先用辨识，然后把这样所获得的信息馈送到给定结构的调节器中来实现适应性控制，而前者则不用显的辨识。这两种方法看来好象沒有多少联系，但大会上有几篇文章却是探讨这两种方法的关联，例如（42A．2）及（46A．3）。后者指出，无论那一种方法都遇到两种困难：第一受控系统本质上是一个“黑箱”，只有输入对控制目的是能接近的。问题在于是否存在一种控制结构，能够产生合适的控制输入？目前已知，无论用直接或间接控制，这问题已获得肯定的回答。第二方面的困难在于发生适应性控制律并证明从任意初始条件出发，控制参数收歛到所希望的值，也就是输出误差信号，渐近地趋于0。文献上大多数自适应控制器只是局部渐近稳定的，直到最近在设计整体稳定的控制器方面也沒有多少工作。该文讨论了适应性控制律与稳定性问题之间的密切联系。

（46B．1）指出早期60年代初麻省理工学院所提的模型参数系统有时不稳定，从而模型参考适应控制应当在稳定性理论基础上设计，文中指出，适应性控制系统的构造可以依据Ляпунов理论或Popov超稳定性理论。

在会议上关于数学规划方面虽然有两个小组的报告，但这方面情况了解得比较少，其中一篇报告（25A.1）对于在一定限制条件下，使某个指标函数取极値，很广泛的一类求最优问题，以严格的惩罚函数类型为基础，提出了一个算法。用一个多项式边界函数，以及参数在限制区域附近移动的负指数惩罚函数来进行修改，其结果把原来具有限制条件的问题，转变为不受限制参数最优化问题，并且不需要像通常的算法那样，把具有限制的问题化成解一系列沒有限制的问题。文中并有用于系统设计的例子，另一分报告（25B.1），对于控制变量及状态变量在不等式表示的限制条件下，讨论了二次型与某种非二次型泛函具有非负性的充分条件，对于二次型情况，得到了一组新的Riccati微分方程，对于所讨论的非二次型情况则化为分析一组具有限制条件的二次型泛函来讨论非负的性质。另一篇（25B.2）对于非线性的限制条件所确定的流型上定义的非线性函数的凸共轭函数进行了讨论，证明了局部型式的Fenchel对偶定理。另一篇（25B.3）讨论线性离散控制系统，控制变量和状态变量具有凸的限制，以及凸的性能指标，用Fenchel对偶原理加以解决，其对应的对偶问题是沒有限制的，这就比原来的问题容易解决，同时讨论了最优化条件与反转换问题。

（五）微分对策与多指标控制

（24A.1）讨论微分对策的现时问题与形式化之间的关系。设运动模型为

$$\dot{x}=f(t,\ x,\ u,\ v),\quad U\in P,\quad V\in Q,\quad u,\ v \text{为各方控制。}$$

当用数字机实现控制时，控制作用是离散化了的，设对双方的采样间隔分别为

$$\varDelta=\{\tau_i,\ i=1,\ 2,\ \cdots\cdots\}\text{及}\varDelta^*=\{\tau_i^*,\ i=1,\ 2,\ \cdots\cdots\},$$

$$\delta(\varDelta)\max_i(\tau_{i+1}-\tau_i),\quad \delta^*(\varDelta^*)=\max_i(\tau^*_{i+1}-\tau_i^*)$$

本文作者把获得信息的情况，在假定u方在τ_i时刻知道$x(\tau_i)$这一总的前提下，分成三种不同类型：1）v方知道$x(t)$和$u(t)$；2）双方都知道对方的控制；3）u方知道v方的控制$v(t)$。根据所获得的信息不同，把双方采取的策略也相应地分成三种，对u方来讲，它们是纯对策、混合对策和反对策三种，而对v方来讲，相应地是反对策、混合对策和纯对策。这些对策集分别记为U和V

设$\omega(x(\cdot))$是$x(\cdot)$的一个泛函，记

$$\gamma = \min_{U} \lim_{\delta\to 0} \sup_{V,\Delta^*} \omega\ (x(\cdot)),$$

$$\gamma^* = \max_{V} \lim_{\delta^*\to 0} \inf_{U,\Delta} \omega\ (x(\cdot))\ .$$

在$\delta\to 0$的极限意义下，对策问题有对策值$\gamma_i{}^0(t_0,\ x_0)$，并且有鞍点。这里i取1到3，表示上述三种不同情形。这是现时的对策问题，但它包含极限过程，不容易决定最优对策。为了便于计算和实现，讨论了三种不同的形式模型，其对策U、V都是“开环”形式的控制集合。然后利用运动方程，可以定出X_u（t_*，x_*，θ）和X_v（t_*，o_*，θ）两个可能的轨线族。然后讨论对策问题：

$$\gamma = \min_{U} \max_{x(\cdot)\in X_u} \omega\ (x(\cdot))$$

$$\gamma^* = \max_{V} \min_{x(\cdot)\in X_v} \omega\ (x(\cdot))$$

这样的对策问题有对策值$\gamma_i{}^0$（t_0，x_0）和鞍点$\{U^0,\ V^0\}$，并且

$$\gamma_i{}^0\ (t_0,\ x_0) = \max_{x(\cdot)\in X_{u^0}} \omega(x(\cdot)) = \min_{x(\cdot)\in X_{v^0}} \omega(x(\cdot)).$$

这种形式化了的对策问题与现时的对策问题就对策值来说是等价的，并且形式的对策问题给出了有效地解现时的对策问题的途径。

（24A.2）讨论了Isaacs提出的几个具体对策问题中判决曲面上的双方决策问题。这些具体对策问题是：

1）“湖中小姊”问题：在圆形湖中E方游泳，企图逃避在湖岸上P方的追踪。在判决曲面上各方都有两个不同的最优对策可供选择。

2）“杀人犯司机”问题，实际上是车追人问题。

3）“两车问题”：一车追另一车。

4）“死角中的老鼠”：老鼠进了死角，它怎样逃避追捕。

Isaacs提出了这些问题，但除车追人问题外，没有给出详细解答。本文作者对上述诸问题都给出了答案。

（24A.3）讨论了“杀人犯司机”问题中追者和逃者对换位置的情形，即追者为人，逃者为车的情形，终点条件为长方形。作者采用Isaacs提出的倒退积分法详细讨论了对策解，描述了“万能曲面”及整个“壁垒”。

（24A.4）给出了n人非合作、多步、有限后效的对策问题的解法，指出了这个解法对工业管理问题中的应用，发展了求平衡点的算法。

本届大会对避免碰撞问题给予一定的重视，上述（24A.3）实际上是用微分对策办法处理避免碰撞。此外还有（38B.2），它讨论计算机辅助的雷达避免碰撞系统。根据目标船的斜距与方位的雷达量测，用计算机辨识出碰撞的危险，也就是算出极小的通过距离与达到这种距离的时间，在必要时，提出要作适当的躲避机动。文中用卡尔曼滤波处理雷达噪声与船机动引起的干扰，这比过去同类问题仅用α-β滤波的情况，是前进了一步。（38B.3）用微分对策描述在大量船只附近使船只安全操纵的过程。

（24A.5）讨论多指标问题。设给了控制系统：$\dot{x}=f\ (t,\ x,\ u)$，$x(t_0)=x_0$，$t_0\leqslant t\leqslant t_1$，

$$u(t)\in U, \qquad t_0\leqslant t\leqslant t_1$$

在U上还给了p个全序关系R_1，R_2，…，R_p和$q-p$个等价关系S_1，S_2，…，S_{q-p}，对每个序关系R_i有选优指标$J_i(u)=\varphi_i(x(t_1))$，$i=1$，…，p。

如果按序关系R_i有$J_i(u_1)<J_i(u_2)$，那么称$v_1(t)$按R_i优于$u_2(t)$

对每个等价关系S_i有等价指标

$$J_{p+i}(u)=\varphi_{p+i}(x(t_1)), \quad i=1, \cdots\cdots, q-p$$

如果$J_{p+i}(\widetilde{u})=J_{p+i}(\overline{u})$，那么称$\widetilde{u}(t)$和$\overline{u}(t)$按$S_i$等价，如果不存在$\overline{u}(t)$，使得$J_i(\overline{u})<J_i(u^0)$，$i=1\cdots$，$p$，$J_i(\overline{u})=J_i(u^0)$，$i=p+1$，…，$q$，那么称$u^0(t)$为弱有效控制。该文把弱有效控制做为多指标控制问题之解。

文中还考察指标为$J(u)=\max\limits_{1\leqslant i\leqslant p'}\varphi_i(x(t_1))$，$(p'<p)$，约束条件为$\varphi_i(x(t_1))\leqslant 0$，$i=p'+1$，…，$p$，$\varphi_i(x(t_1))=0$，$i=p+1$，…，$q$的最优控制问题。如果$u^0(t)$为上述最优问题的解，那么它也是前面多指标控制问题的弱有效控制。这样就可以把最优控制的各种必要条件应用于多指标控制问题，得到弱有效控制的相应的必要条件。文中给出了各种弱有效控制必要条件的形式。

(24B.4) 把多指标最优问题看做如下问题：设E是线性拓扑空间，E_0是半序线性拓扑空间，F_0是$E\to E_0$的映照。$Q_i\subset E$，$i=1$，…，$n+1$，$Q=\bigcap\limits_{i=1}^{n+1}Q_i$，考察最优问题：

$$\min\{F_0(x):\ x\in Q\}$$

文中把Дубовицкий-Милютин 的减小方向，容许方向、切方向等概念推广到有序线性拓扑空间中去，得到与 Дубовицкий-Милютин 定理完全相类似的各种必要条件。并把这些应用于具有矩阵指标的最优化问题中。

(24B.5) 讨论误差统计事前描述不知道的多准则对策问题。

（六）分布参数系统和时滞系统

这次会议中分布参数系统方面的报告很少，实质上只有二篇报告和一篇一般综述。

在〔48.1〕中，研究了弦振动系统的可控点的分布，假定弦长为l，用一集中力在l上的某点对弦的横向运动进行控制。作者的结论是除振动各振型的节点是不可控的以外，还有一切有理数表示的点都是不可控的，还有所有吕维（Louiville）超越数对应的点也是不可控的；然而一切代数无理数对应的点是可控点。最者，一切不可控点的集合测度（Lebesque）为零，即一切可控点的集合构成弦长l的满测度。

在〔48.6〕中研究了"有相限制的分布参数系统的最优控制求解方法"。作者们把线性规划方法推广到满足偏微分方程限制条件使某一希氏空间的线性泛函取最大或最小值。设某一受控物理过程的状态变量$u(x)$是无穷维的，$x=(x_1,x_2,\cdots,x_n)\in R^n$，满足方程式

$$Lu=\sum_{ij}\frac{\partial}{\partial x_i}a_{ij}(x)\frac{\partial u}{\partial x_j}-a(x)u(x)=0, \quad x\in\Omega; \tag{1}$$

和边界条件 $$\frac{\partial u(x)}{\partial N}=\sum_{ij}a_{ij}(x)\frac{\partial u(x)}{\partial x_j}\cos(\overrightarrow{b},x_i)=g(x), \quad x\in\Gamma=\partial\Omega; \tag{2}$$

系统的输出变量为

$$\rho(x)=u(x),\quad x\in\Gamma \tag{3}$$

对这样的系统提出下列问题：

问题一：求一种边界控制$g(x)$，

$$g(x)\geqslant d(x),\quad x\in\Gamma \tag{4}$$

$d(x)$是给定的函数；使输出

$$\rho(x)=u(x)|\,\Gamma\geqslant 0, \tag{5}$$

而且泛函

$$\langle C,\ \rho(x)\rangle_{L_2(\Gamma)}=\max, \tag{6}$$

C为给定的$L_2(\Gamma)$中的元。

问题二：求出满足（1）—（5）条件的$g(x)$，$u(x)$和$\rho(x)$使

$$\langle L_u,\ u\rangle_{L_2(\Omega)}-2\langle C,\ g(x)\rangle_{L_2(\Gamma)}=\min \tag{7}$$

问题三：在双向限制条件下，

$$\rho_{\max}(x)\geqslant\rho(x)\geqslant 0,\quad x\in\Gamma \tag{8}$$

$$g_{\max}(x)\geqslant g(x)\geqslant d(x),\quad x\in\Gamma \tag{9}$$

求$\{g,u,\rho\}$使某一单调函数$f(\rho)$取极大值

$$f(\rho)=\max \tag{10}$$

在〔48.5〕中提出了解决这类问题的算法，这种算法的理论基础是Lions的“偏微分方程最优控制”一书中的一些定理。这个问题是从研究油田含油构造中多相（油、汽）流动问题时抽象出来的。

波兰Gorecki等人对分布参数最优控制问题作了综述，详述了在线性系统可控性和可观测性、二次型指标最优控制问题，希尔伯特空间的线性规划问题、最优控制的存在性和唯一性等问题的各国所得到的最新结果。对于今后分布参数理论研究的主要方向，作者认为应加强最优控制的近似计算问题或逼近问题。这对实践问题中的应用有很重要的意义。作者们详细地引述了在波兰、法国、美国等国家内所作的工作和取得的成绩。

讨论时滞的常微分方程的控制问题的报告有三篇。在〔48.2〕中研究了下列问题：

$$\frac{dx}{dt}=A_{-1}\frac{dx(t-h)}{dt}+A_0x(t)+A_1x(t-h)+Bu(t),\quad x\in R^n,$$

用了矩阵拉氏变换法，令控制规律为

$$u(s)=(k_0+zk(s))x(s),$$

作者讨论了系统的稳定性和其它问题，

在〔48.3〕中作者讨论了离散系统

$$x(k+1)=Ax(k)+Bu(k-h_1),$$
$$y(k)=Cx(k-h_2)$$

的反馈设计，讨论了用数字计算机作控制器的控制规律：

$$Z(k+1)=WZ(k)+k_{22}Z(k-h)+k_{21}y(k-h_1),$$
$$U(k)=K_{11}y(k)+K_{12}Z(k-h_2)+V_k,$$
$$h=h_1+h_2$$

作者证明，这类系统总可以化为含有一个滞后环节的线性系统，它的极点可以通过反馈规律的选择而任意配置。

在〔48.4〕中研究了系统

$$\frac{dx}{dt}=A_0x+A_1x(t-\varDelta)+Bu+E^*\omega$$

$$y=C_0x+C_1x(t-\varDelta)+Du+F^*\omega$$

的可解性（Solvable）和在扰动ω的作用下系统的强壮性（robustness）。

（七）奇异摄动理论

在这次会议中，控制问题的奇异摄动理论方面文章有七篇。在会议前，六月初，曾经由IFAC和IRIA（信息化与自动化研究所）在巴黎IRIA举行了一次奇异摄动理论的国际性学术会议，报告的论文约有16篇。对于这方面的研究，国内还没有开展，这里先扼要地加以说明，再对会议的主要论文作一些介绍。

对于某些控制对象，它的动态特性包括变化快的部分和变化慢的部分，例如时间常数小的环节和时间常数大的环节。或者高频部分和低频部分。对于这种系统，如果不考虑高频特性，那么可以把系统的阶数降低，便于分析处理。但所得到的结果仅只是有关低频的特性。如何在分析低频特性的基础上加以修改，以求得系统的动态特性，可以认为是奇异摄动理论所考虑的途径，这类问题用数学可以描述如下：

系统的特性由两部分组成

$$\dot{x}=f(x,z,u,t,\mu) \qquad (1)$$

$$\mu\dot{z}=g(x,z,u,t,\mu) \qquad (2)$$

其中$\mu>0$是一个小参数，x,z,u分别是n，m，r维向量，前一个式子代表慢变部分，后一式代表快变部分，如果$\mu=0$，系统的阶将由$n+m$降低为n，因为

$$0=g(\bar{x},\bar{z},\bar{u},t,0) \qquad (3)$$

可以把$\bar{z}$解出来作为$\bar{x}$，$\bar{u}$的函数

$\bar{z}=\Phi(\bar{x},\bar{u},t)$代入前一式，得到

$$\dot{\bar{x}}=f[\bar{x},\Phi(\bar{x},\bar{u},t),\bar{u},t,0]=\bar{f}(\bar{x},\bar{u},t) \qquad (4)$$

为了说明问题，考虑常系数线性的简单的例子：

$$\dot{x}=A_{11}x+A_{12}z+B_1u \qquad (5)$$

$$\mu\dot{z}=A_{21}x+A_{22}z+B_2u \qquad (6)$$

当$\mu=0$，求得

$$\bar{z}=-A_{22}^{-1}A_{21}\bar{x}-A_{22}^{-1}B_2u \qquad (7)$$

以及

$$\dot{\bar{x}}=(A_{11}-A_{12}A_{22}^{-1}A_{21})\bar{x}+(B_1-A_{12}A_{22}^{-1}B_2)u \qquad (8)$$

引入变量

$$\eta=z+A_{22}^{-1}A_{21}x+\mu M_1x \qquad (9)$$

适当地选择M_1可以将（5）、（6）化为

$$\dot{x}=(A_{11}-A_{12}A_{22}^{-1}A_{21}+\mu M_2)x+A_{12}\eta \tag{10}$$

$$\mu\dot{\eta}=(A_{22}+\mu M_3)\eta \tag{11}$$

值得注意的是η的特性已经分离出来，这个起修改作用的项可以从快变部分求出，然后作为外加作用而影响慢变部分。在（11）式中，把自变量t的比例尺度加以改变，可以写成

$$\frac{d\eta(\tau)}{d\tau}=(A_{22}+\mu M_3)\eta^{(\tau)} \tag{12}$$

其中 $\tau=\frac{t-t_0}{\mu}$，在$t=t_0$处 $\tau=0$ (13)

利用上述步骤可以得到系统的解的结构为

$$x(t)=\overline{x}(t)+O(\mu) \tag{14}$$

$$z(t)=\overline{z}(t)+\eta(\tau)+O(\mu) \tag{15}$$

$\eta(\tau)$ 只在一小段时间〔t_0，t_1〕内有效，此后

$$z(t)=\overline{z}(t)+O(\mu)$$

关于公式（1），（2）这种奇异摄动型问题，有一个非常重要的性质，即在理论上，论证了对于变参数及非线性系统，方程的解仍然具有公式（14）、（15）所表达的性质。

由于不少的物理对象，它们的特性表现为奇异摄动型的问题，在电力系统中，μ代表机器的电抗，在工业控制系统中，μ可能表示执行机构的时间常数，在生物化学对象中，μ可以表示少量的酶，在火箭等飞行器方面，也有大量应用，对于奇异型的问题，提出要求解决满足各种类型指标的最优控制，稳定性问题，过滤和平滑问题，以及时滞系统等问题。总之奇异摄动理论在控制中的应用已成为近来自动控制理论方面正在研究的一个小的分支。

奇异摄动理论的研究，对于线性系统，还在做一些推广性的工作，例如研究系统中具有若干个数量级相同，但并不相等的小参数的情形。另外研究有关以奇异摄动理论为基础所引出的微分方程的数值计算方法，这方面的内容在IRIA讨论会上有所反映。另外就是关于非线性问题的研究。例如带奇异弧的非线性问题，包括快、慢两部分的系统是奇异的，而令小参数趋于零后所得的问题是正则的。结合飞行控制的需要，使用了能量变换方法，把某些系统状态变换成新状态，其动态特性比原来的慢，这种变换能降低模型阶数，但会导致两点边值问题，用奇异摄动分析能对模型阶数作进一步减小，并导致非线性反馈控制解，然后分开时间标度，最后能把原来的两点边值问题化作一系列代数函数的逐点求极值，见23.1，23.4。会议论文中，有一篇（23.2）文章讨论了辨识时间尺度的问题，辨识适当的时间尺度在包含小参数的系统的分析中是关键的一步，当系统模型包含随机起伏时，由于起伏与有害元的相互作用而使问题复杂化了，考虑了这种带随机干扰的系统的时间标度的分离，特别考虑了非线性情形，当小参数趋于零时，状态的极限的属性就不像线性情况那样简单。还有一篇文章（23.3）讨论了关于在人工膜内酶的反应所引出的问题，关于酶的反应如果利用拟稳定状态（PSSH）的假设，那么就可以考虑成奇异摄动现象，然后再讨论关于这种反应的最优控制，得到几条定性的结论。

（八）大系统的发展

工程控制论的基本理论和方法能不能应用到更大的范围和领域？能不能应用到社会经济