

# 控制理论的发展趋势

W. M. Wonham

(加拿大多伦多大学)

**整理者按：**加拿大多伦多大学 W. M. Wonham 教授于1979.9.9—1979.9.25前来我所讲学。在讲学期间，作了题为“控制理论的发展趋势”的讲演。这份资料是根据 Wonham 教授的讲演记录，翻译整理而成的，未经他本人看过，仅供读者参考。为了方便国内读者阅读起见，我们提供了一些文献列于之后，供大家参考。

Wonham 教授是国际控制理论界的知名学者，是 IFAC 理论委员会的委员。他创立的“几何状态空间理论”，在控制理论中自成一派。他在讲演中发表的一些观点，是很有参考价值的。

今天我讲的题目是大家关心的话题，题目是“控制理论的发展趋势”。当我开始写这个题目时，发现这个题目太大了，不好讲。我讲得不好之处，请大家原谅。其中讲到每个话题时，介绍每个题目的背景和目前的一些工作，以及发展的趋势。

控制领域，今天讲四个方面(四个时期)。前三个是过去的，最后一个是现在和将来的，前三个方面的日期不一定确切。每个时期讲讲主要的代表人物，以及使用的数学工具。

控制理论的开始，可以回逆到铜壶滴漏的历史。但我不准备从这里讲，我想从1949年开始讲起：

日期	代表人物	工具(技巧)
1949—1958 (第一阶段)	Wiener	福里哀分析→控制
1959—1968 (第二阶段)	庞特列雅金， 贝尔曼及卡尔曼	微分方程及泛函分析 →控制
1969—1978 (第三阶段)	卡尔曼及 Various	抽象代数→控制
1979— (第四阶段)	(还没有代表人物)	数据结构，逻辑与 形式语言→控制

第四阶段是激动人心的、向我们提出挑战的阶段。现在还不清楚这个阶段的重点是

什么？

主要方向：

1. 稳定性；
2. 最优化；
3. 定性结构；
4. 计算机与控制。

这样分为四个部分的方式有缺陷，因为它们之间内容有重复。

## 1. 稳定性

李雅普诺夫稳定性理论很早就有了，五十年代，Krasouskij, Lefschitz 和 Lasalle 等人重新发现李雅普诺夫原理在控制理论中的重要地位。

Zames, Sandberg, Popov 等人用福里哀分析和泛函分析研究绝对稳定性，Aizermann 猜想，用圆准则判定非线性系统的稳定性问题，卡尔曼和 Yacubovicz 利用状态空间分析方法(即用泛函分析方法)解决同一问题(Aizermann 提出问题，卡尔曼和 Yacubovicz 用状态空间分析方法解决了这一问题)。

C. A. Desoer—M. Vidyasagar 于1972年，

对上述方法作了总结，写成了一本书<sup>[9]</sup>。

### 新近的工作与目前的趋势

稳定性的研究主要趋势是在大系统中，当然在力学系统中，也还有人在工作。

对大系统，为什么我没有作为一个方面提出来呢？！因为“大”不能作为科学研究的标准，但是在美国、加拿大，“大”意味着和管理问题联系在一起，科学家喜欢用“大”是为了吸引官贵们注意，从而得到政府的经济支持。我不把“大系统”作为专题来讲，但是在谈到上面提及的四个方面中，经常出现的问题来涉及。

大系统是指非常松懈的耦合的许多分系统的总体。研究大系统的稳定性问题的方法不复杂，先对每个子系统研究其稳定性问题，然后研究整个系统的稳定性问题，可得到充分条件。直观的想法是：所有子系统是稳定的，则整个系统也应该是稳定的。采用的数学方法仍是李雅普诺夫原理，福里哀分析以及Zames的泛函分析方法等。例如，代表作为美国中西部的Michcl和Miller的关于李雅普诺夫原理和福里哀分析的文章<sup>[2-6]</sup>。美国西海岸的Siljak的关于李雅普诺夫原理的文章<sup>[7, 8]</sup>。

C. A. Desoer和他的学生W. S. Chan(中国人)认为<sup>[9]</sup>：大系统=嵌套环(图1)。一环

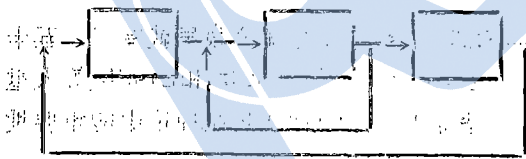


图 1

套一环，由内环一层一层地向外扩展。可惜的是，这种看法没有受到足够的重视。我认为应该受到重视。

这一段的工作可参看：Horowitz 1979年的工作及Kelley 1968年的工作。

Allwright和Wonham于1979年的工作是最新成果，这是一个有趣的工作(不敢说是代

表性的工作)。他们认为内回路时间标度小，外回路时间标度大，而且越外越大。

当然还有随机等问题。

关于稳定性和频率响应之间的关系，随回路由内向外不断变化，这是个有趣的问题，这个问题将在确定性领域内广泛应用。

我认为在大系统领域内，理论上不会有急剧的变化和重大突破，在确定性领域和随机领域中会有继续的研究，但主要是现有理论的应用。

## 2. 最优化

这里有庞特列雅金的变分方法，贝尔曼的马尔科夫(Markovian)判决(贝尔曼他自己说是受了统计理论学家Wald的序贯决策的启发，形成状态演化理论的)。

此外还有Neustadt, Canon/Cullum/Polak, Berkovitz的工作，以及七十年代初期和中期，Fleming和Rishel在随机控制问题方面的工作<sup>[10]</sup>。

在俄国也有类似的平行的工作，这里不特别提了。

目前最优化方面，大量的工作是在大系统方面。与稳定性问题讨论的方法相似，先研究子系统的最优性，然后考查整个系统的最优性。这里，把大系统看作是普通金字塔式的体系(图2)：

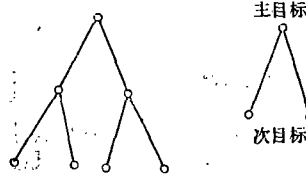


图 2

如果用一个园代表一个子系统，每层由几个园构成，最主要的放在最上面。从最低层的每个园的最优化做起(他们可能是彼此矛盾的)，由上一层进行协调，再回到下一层进行修改，进行迭代。最上层进行总的协调，与嵌套形相

同,都有一个反馈。其代表人物是 M. D. Mesarovic<sup>[11, 12]</sup>、L. S. Lasdon<sup>[13]</sup>, 他们研究的是一般系统理论, 其中数学方法用的不多。W. Findeisen (华沙)的工作进入到另一水平, 主要是从数学上把 M. D. Mesarovic的工作严格化了<sup>[14, 15]</sup>。

处理大系统的最优问题的方法是: 局部最优优化加协调。在处理过程中, 局部最优优化问题不大, 困难与微妙在于协调。

Varaiya (美国加州大学 Berkeley 分校)是在协调工作方面的代表人物, 主要研究反复迭代的收敛性问题。

### 线性二次高斯 (简记为 LQG) 问题

线性金字塔式的体系, 可以说是大系统研究中的一般趋势, 因为这个问题既是作了一定简化到能具体求解的地步, 又具有一定的代表性。

Singh 女士 1978 年用 LQG 系统结构, 来考察水利资源 (河流污染) 问题, 使用了矩阵 Riccati 方程的方法, 是现有一些方法的综合, 并且编成了算法语言。目前这类问题应用的不多, 讨论也不多, 我估计这将成为处理大系统的一种标准方法, 将越来越多地采用它。

大系统中还有参数最优优化问题。目前这方面的文章不少, 其中有意义的是把数值分析方法用于参数最优优化问题。其代表人物是: E. Polak, J. Callum, 他们是在数值计算的角度考察问题, 著有 "Algorithms for numerical computing" 一书。

## 3. 多变量系统的定性结构理论

开始于 1968 年, 目前仍在不断发展之中, 其过程是:

最优化 → 状态空间 → 能控性与能观测性

对于单变量系统, 能控性概念出现得更早。Bang—Bang 控制方式的获得就是一例。这在美国和俄国都有。

卡尔曼最早认识了能控性及能观性的重要

意义, 最先考虑的是能控性 (1963), 然后用对偶的方式得到能观测性的定义。

从古典理论中的极点配置问题, 也引出能控性概念。有人把能控性与极点配置等价地看待:

能控性  $\equiv$  极点能配置性

(整理者注: Wonham 本人于 1937 年发表了多输入情形的关于极点配置的文章; 黄琳、郑应平、张迪等于 1963 年发表了单输入情形下的极点配置问题)。

系统等价问题, H. H. Rosenbrock 在 1970 年左右利用多项式系统矩阵解决频率域方面的问题。

系统解耦问题, 最早于三十年代, 由俄国人用于电机中的抵消干扰问题, 钱学森的 "工程控制论" 一书中, 写了这个问题 (在频域中表示的)—1955 年。Falb 和 Wolovich (1967 年) 在状态空间中, 讨论了系统解耦问题<sup>[16]</sup>。

1968 年左右发现, 控制理论各领域的工作没有协调, 显得很零星, 并且一些重要问题被忽视了。1968 年以后, 对线性系统各方面的工作进行统一处理, 十年来, 已有了很大进展。

### 最近的工作与目前的趋势<sup>[17]</sup>

① 频域 (FD) 设计 (Rosenbrock 等人在英国曼彻斯特——Manchester 的工作)

频域设计与计算机的图形的交互作用联系在一起设计, 这种方法关键在于如何使得对角线上园为占主导地位? Rosenbrock 的工作的关键, 在于搞一个预补偿器进行分解, 使所考察的多项式阵 (对象的传递特性阵) 是主对角线上的园占主导地位的, 即主对角线上的园与所在行、列的园相比, 其模大得很多。这样, 多输入多输出系统的设计, 就类似于单输入单输出系统的设计, 问题在于对于给定的系统, 如何达到使主对角线上园占主导地位? 即使做到了这一点, 真正系统与对角线上园占主导地位的系统之间的差别 "多大" ?

Rosenbrock 学派的设计方法是基于经验之

上的设计方法，数学上表达不够（整理者注：Wonham称之为英国的经验哲学学派，这里并无任何贬低之意，当然这个学派与北美学派相互补充）。

基于特征根的频域设计（曼彻斯特的A.G.J. MacFarlane和剑桥大学的I. Postlethwaite）<sup>[18]</sup>。这种方法要求计算方形矩阵的特征值，结合特征轨迹研究线性系统稳定性的园准则，使用的工具是复变函数论，牵涉到Riemann流形的研究，因此要求有计算机及很好的显示设备进行交互作用。Wonham称这个学派为“新古典学派”（Neoclassical）。

### ②实现理论（时域或频域）

1968年以来，卡尔曼利用模论对系统作了研究（“在环 $R(\lambda)$ 上的交换群”）。对线性系统，将状态空间与转移映像联系起来、作了统一处理。在这里能控性与能观测性这两个概念起了重要作用，因为目的是要找到最小实现。根据输入——输出描述得到的状态描述这一方法，可以推广到范畴论，其代表人物是Arbib和Manes（1973—1974在美国马萨诸塞州立大学），文章发表在《Automatica》上。

上述这些理论，促使产生了由Hautus和Heymann提出的，用模论描述的反馈<sup>[19,20]</sup>，以及在环上的系统的实现理论，这是由卡尔曼的学生Sontag及卡尔曼的同事Rouchaleau发展的<sup>[21—24]</sup>，可称为卡尔曼学派的延伸。

这些理论应用于有时滞的线性微分方程描述的系统，同时也用于非线性微分方程描述的系统，还用于带有两个或更多个时间变量的情形。

### ③多项式系统阵与传递阵的代数理论

在实现问题上用得较多，这个题与前面的题目有重复，而且联系越来越多。用

$$P(\lambda) = \begin{bmatrix} A - \lambda I & B \\ D & E \end{bmatrix}$$

和它的推广，Rosenbrock建立了工程上有意义的系统等价的概念，1970年他写的一本书中，

介绍了系统等价的概念，1974年的书中，介绍了多项式阵主对角线上园占主导地位的内容。

美国布朗大学Wolovich从特殊观点看待系统的传递矩阵 $H(\lambda)$ ：

$$H(\lambda) = N(\lambda) D^{-1}(\lambda)$$

模仿单变量系统的方法，将多变量系统的传递函数阵作形如上述的分解，然后得到有关的性质。

Rosenbrock, Wolovich等人的工作，从形式推导、计算上是很聪明的，但数学家不满意，因为没有指明在什么范围内讨论问题。后来，Heymann<sup>[25]</sup>和Hautus<sup>[19]</sup>等用模论观点统一了Rosenbrock和Wolovich的工作，Fuhrmann（以色列人）把这推广到了无穷维的情形。

Wolovich式的分解，还可以用于反馈、干扰解耦问题上去。

### ④(C, A, B)的正则形式及各种变换群下的正则形式

对于用状态描述的系统

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}$$

在状态空间中选定某一基，当基变化后，A、B、C有什么变化？其中不变的又是什么？Brunovsky/Rosenbrock研究了能控性指数（与之对偶的有能观性指数）在坐标变换下不变的问题，利用的方法是Kronecker指数的不变性。

关于(A、B、C)有反馈时，对于坐标变换下不变的问题，波兰人Hazawinkel及美国哈佛大学的Byrnes等使用微分几何中的纤维丛理论进行了研究。他们的结论是：不存在整体的正则形式，原因是微分流形扭曲（奇变）得厉害，不能整体坐标化（局部还是可以的）。这隐含着如下的结论：不能得到结构的综合和辨识（辨识的本质在于用几个参数来代表系统）。因此，不可能用集中参数的工具来搞，这也就是为什么从事辨识工作的人，工作难做的理由之一。

### ⑤几何状态空间理论

这不必讲了，这几天我们讲得不少了（整理者注：Wonham教授于1979年9月10日—9月22日在北京共讲了十一次，内容可参阅作者所著〔26〕）。另外还有数值方面的工作（Laub/Moore〔21〕；非线性推广（Krener, Mikhail, …）；与系统多项式阵的联系（英国的 Karcaniars, 发表在International J. Control, 1979上。瑞典人Pernebo, 他是Astrom的学生, 有关的文章可直接写信到瑞典去索取）。

### ⑥李群论

研究非线性系统的能达性问题，这方面有美国哈佛大学的 Brockett, Sussmann—Jurjivic, Krener〔28〕…。在微分几何上的能达性及能观测性研究，可用于人造卫星的姿态控制问题上。但是，目前仅在理论上进行工作。

### ⑦代数几何

Robert Hermann（与 Clyde Martin）搞的系统理论中的代数几何论〔20, 29〕。

### ⑧随机辨识

这里有个趋势值得注意：线性模型中MLE的强一致性（MLE为：Maximum Likelihood Estimation）。这即当观测数据愈来愈多时，将有以概率为1的收敛性。

### ⑨自适应识别

目前使用的工具是微分方程理论中的李雅普诺夫原理。

这种识别方式对输入要求不是很严格的，但要求大，使它的变化能激发起系统的所有振型，以便进行识别，即所谓的“输入→持久的受激”，美国耶鲁大学的Narendra在这一方向上有工作。

## 4. 计算机与控制

这是一个有趣的问题，但也是个难谈的问题，这正如在1958年时，谈微分方程对控制理论的影响一样，并且我认为比1958年时更难。当时，微分方程、泛函分析已经是现成的摆在

那里，只等人们拿去用；但是，目前，计算机理论正在发展，还不成熟，如何用于控制理论还看不清楚。

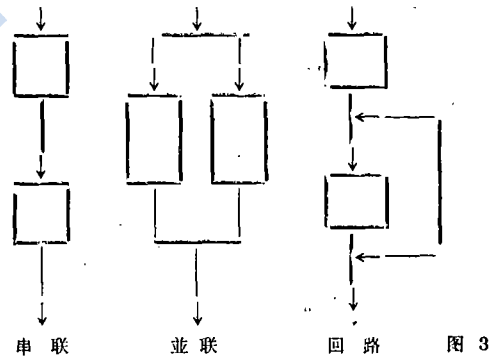
### 背景：管理逻辑的工程研究

分管理次序、优先任务（例如：在汽车行驶过程中，油没有了应如何处理），可参看“Siemens（西门子）Review”或“IEEE Trans. Software Engr.”。

从理论上讲，这些都没有多大兴趣，但可很好提供背景以使公式化。

另外是所谓结构程序问题，荷兰人Dijkstra从事这方面的工作，首先定义许多程序块，然后以某种方式组合起来。而组合的方式除满足问题的若干要求外，还要便于可靠性检查，亦即是程序设计代数化技巧。每个程序块用代数符号表示，从代数运算结果看程序块组合的结果。

Dana Scott于1970年左右，用格论对上述问题进行研究。用格论的完备性，来讨论回路运算的完备性，这类运算如何进行将是最佳的？最佳的意义是什么？……由基本模块如何构成整体？Dana Scott开创后，许多人在这个方向进行工作，可见“Symposia on Math Foundation of Computer Science” S-V(图3)。



### 目前趋势：

很难谈这个方向上的趋势，因为不成熟，但发展又很快。

### 管理控制理论

这里不仅有微分方程描述的动态系统，还

有管理逻辑与计划协调。

例如机器人开汽车的问题，汽车运行有它自己的动力学规律，但机器人如何操纵，却直接与汽车的运行特征有关，机器人操纵靠指令，其输入是语言学上的问题。这是个二级问题，还可能有三级的情况(参见图4与图5)。

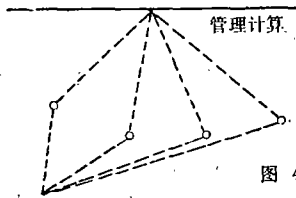


图 4

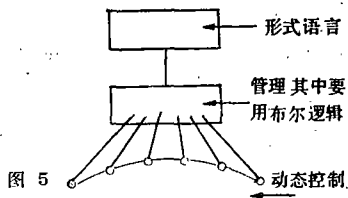


图 5

真正的大系统应是三级语言，最上面的语言，最接近自然语言。

→形式语言→管理→动态控制

为了运转可靠，还应该要有反馈，即形成所谓嵌套回路(参见图6)。这个问题的困难在于不能用一种语言来描述，在不同层次有不同语言，而不同层次之间的联系(例如反馈)，用什么语言联结?

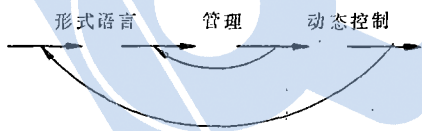


图 6

我认为：大系统即为多种语言的系统。在动态反馈部分是误差补偿器，而在管理部分，应该是模式识别，至少不能再是误差补偿。

因此，将来的发展方向是：图象识别、人工智能、机器人。

#### 参考文献

[1] C. A. Desoer, M. Vidyasagar  
Feedback systems: Input-output properties

Academic pr. New York, 1975

[2] A. N. Michel  
Stability analysis of interconnected systems

SIAM J. Control, Vol. 12, No. 3

pp. 554—579 (1974)

[3] R. D. Rasmussen and A. N. Michel

Stability of interconnected dynamical systems described on Banach spaces

IEEE Trans. AC Vol. 21, No. 4,

pp. 464—471 (1976)

[4] D. W. Porter and A. N. Michel

Input-output stability of time-varying nonlinear multiloop feedback systems

IEEE Trans. AC, Vol. 19, No. 4,

pp. 422—427 (1974)

[5] E. L. Lasley and A. N. Michel

Input-output stability of interconnected systems

IEEE Trans. AC, Vol. 21, No. 1,

pp. 84—89 (1976)

[6] Proc. 8th Asilomar Conf.

pp. 476—482 (1974)

[7] L. B. Jovic, M. R. Pavella and D. D. Siljak

Multimachine power systems: stability decomposition, and aggregation

IEEE Trans. AC, Vol. 23, No. 2,

pp. 325—332 (1978)

[8] Proc. 5th IFAC Congr. Paris 1972

C—32 pp. 1—11

[9] C. A. Desoer and W. S. Chan

The feedback interconnection of multivariable systems: simplifying theorems for stability

Proc. IEEE Vol. 64, No. 1,

pp. 139—144 (1976)

[10] W. H. Fleming and R. W. Rishel

- Deterministic and stochastic optimal control Springer, Berlin, 1975
- [11] M.D. Mesarovic, D. Macko and Y. Takahara  
Theory of hierarchical multilevel systems  
Academic Pr., New York, 1970
- [12] M.D. Mesarovic  
Two coordination principles and their application in large scale systems control Automatica Vol.6
- [13] L.S. Lasdon  
Optimization theory for large systems  
Macmillan, London, 1970
- [14] W. Findeisen  
Hierarchische Steuerung systems  
(原文为波兰文, 1974) 1977
- [15] W. Findeisen et.  
Control and coordination in hierarchical systems  
Wiley, 1979
- [16] P.L. Falb, W.A. Wolovich  
Decoupling in the design and synthesis of multivariable control systems  
IEEE Trans. AC, Vol. 12, No.6, pp.651—659 (1967)
- [17] A.G.J. MacFarlane  
IEEE Trans. AC, Vol.24, No.2, pp.250—265 (1979)
- [18] A.G.J. MacFarlane and J. Postlethwaite  
Extended principle of the argument  
Int. J. Control Vol. 27, No.1 pp.49—55 (1978)
- [19] M.L.J. Hautus and M. Heymann  
Linear feedback—an algebraic approach  
SIAM J. Control and Optimization vol.16, No.1, pp.83—105 (1978)
- [20] SIAM J. Control and Optimization Vol.16, pp.743—755 (1978)
- [21] Symp. on algebraic system theory 1975
- [22] J. nonlinear analysis methods, theory and appl. pp.55—64 (1976)
- [23] SIAM J. Control & Optimization Vol.17, pp.139—151 (1979)
- [24] Y. Rouchaleau  
Linear dynamical systems over integral domains  
J. computer and system sci. Vol.9, No.2, pp.129—142. (1974)
- [25] M. Heymann  
Structure and realization problems in the theory of dynamical systems  
Springer, 1975
- [26] W.M. Wonham  
Linear multivariable control, a geometric approach  
Springer-Verlag, Berlin, 1978
- [27] P.C. Moore and A.J. Laub  
Computation of supremal (A,B)—invariant and controllability subspaces  
IEEE Trans. AC, Vol. 23, No. 5, pp.783—793 (1978)
- [28] R. Hermann and A.J. Krener  
Nonlinear controllability and observability  
IEEE Trans. AC, Vol. 22, No. 5, pp.728—740 (1977)
- [29] R. Hermann and C. F. Martin  
Applications of algebraic geometry to systems theory—part 1  
IEEE Trans. AC, Vol. 22, No.1, pp.19—25 (1977)

秦化淑、许可康 整理  
(中国科学院系统科学研究所)