

内部资料 不得外传

# 2000 年的中国研究资料

## 第 20 集

### 系统工程国内外水平和差距

中国系统工程学会

中国科协 2000 年的中国研究办公室

1984.8

---

第 20 集

# 系统工程国内外水平和差距

中国系统工程学会

中国科协 2000 年的中国研究办公室

1984.8

## 序 言

根据中国科学技术协会开展“2000年中国的研究”的要求和中国系统工程学会1983年11月理事会议扩大会议的决议,我们组织编写了“2000年的中国系统工程”一书。由于我们布置较晚,作者编写时间只三、四个月,未免仓促,再加我们认识的片面性,在题材的选择和作者的邀请方面都有我们的局限性,因此本书难以全面反映我国系统工程的所有侧面,也难以有充分时间让作者们去作详细调查,以期得到对2000年有更为可靠的长期预测。当然这些不是文章作者们的责任,因为他们已经付出了大量的劳动。由于时间不允许我们再拖,也来不及再请各方面专家反复推敲,匆忙抛出这本急就章来。目的是抛砖引玉,希望引起更多同志对工程系统的现状和未来的兴趣和进一步的讨论,尽管有些同志曾找到其它有关同志讨论过某些内容,也得到了有益的帮助。但是为了更利于自由发表看法,我们一律请作者在文后自具其名,以便文责自负。

要写好中国系统工程是不太容易的,因为这门学科在我国得到较广泛和迅速的发展毕竟是最近三、五年的事,它的范围、内容以及发展趋向,甚至它的名词本身也有待我们去探索清楚。但好在我们邀请到的文章作者们都是各自领域的专家,有较高的水平,他们将帮助我们弥补一些不足的地方。

按照钱学森同志对工程系统的思想体系的认识,本书有三篇文章是介绍系统科学方面的工作,十一篇文章是介绍各项具体的系统工程,书中有一篇文章是介绍用系统工程方法来进行2000年的中国研究,另外有两篇着重介绍国外的管理科学和工程系统的总的发展情况,最后有一篇是以较短篇幅综述我国系统工程总的发展情况。

本书主要编辑为许国志、陈立、顾基发。

本书编写过程中得到了柴木良、经士仁以及国防科工委情报所一些同志们的热情帮助,顺致谢意。

# 目 录

## 序 言

### 第一部分 综 述

中国系统工程的发展综述.....许国志、陈立、顾基发 (1)

### 第二部分 理论与方法

系统科学.....方福康 (4)

模糊数学和模糊系统.....汪培庄 (10)

系统动力学.....王其藩 (17)

“2000年的中国”的系统研究.....王慧炯、李泊溪 (22)

### 第三部分 应 用

社会经济系统工程.....陈立、袁嘉新 (33)

军事系统工程.....凌如镛 (42)

能源系统工程.....刘 豹 (46)

农业系统工程.....杨挺秀 (52)

矿业系统工程.....辛镜敏 (58)

化工系统工程.....杨友麒 (65)

信息系统工程.....柳克俊 (74)

科技管理系统工程.....侯定丕 (79)

城市系统工程.....杨纪良 (83)

巧夺天工—展望生态系统的未来.....马世骏、李典谟、王如松 (95)

教育系统工程.....车宏安、杨晓青 (100)

### 第四部分 国外情况介绍

国外管理科学.....沈荣芳 (104)

国外系统工程.....方永绥 (107)

# 中国系统工程发展综述

## 一、引言

系统工程在中国最早有系统、有组织的应用是在六十年代初开始的。当时一些导弹研制部门成立了总体设计部。他们负责导弹的预研、研制、生产、试验和运用的组织管理工作,同时使用了一些当时国际上应用的一些系统工程方法,如计划协调技术(也称网络技术)等。但是更大规模的研究和应用系统工程是从七十年代中期才开始的。当然它的几个重要支柱,如运筹学、控制论、管理科学和信息论等发展历史却要追溯到五十年代或六十年代。由于篇幅所限,本文只介绍最近几年的情况。

## 二、中国系统工程现状

七十年代中期,我国部分专家已开始注意到系统工程这一学科在我国的发展前途,在各种场合进行宣传。其中以钱学森等同志在文汇报1978年9月发表的文章“组织管理的技术——系统工程”影响最大。在这前后,教育部、航空学会、自动化学会、管理现代化研究会等又召开了一系列系统工程方面的会议,在系统工程的宣传、推广和队伍组织方面都作了很好的准备工作。1979年10月国防科委和其它单位在京联合召开系统工程学术会议。会上钱学森、关肇直等21位学者联合倡议筹建中国系统工程学会。经过一年多筹备,1980年11月终于建立了中国系统工程学会,选出了钱学森、薛暮桥为名誉理事长,关肇直为理事长的领导班子。至今开过三次年会和各种专业委员会的专业学术会议13次。此外,还同兄弟学会一起组织过两次国际学术会议:中美系统分析会议(西安,1981年)和北京国际系统和控制会议(1984年)从这几年发展情况看我国系统工程有下列几个特色:

### 1、系统工程的应用有了很大的发展

四、五年前在系统工程学术会议上大部分报告属于宣传、普及和准备应用方面居多。由于这四、五年各方面的努力,在军事、社会经济、能源、农业、矿业、水利、环境、交通、人口、大型项目管理、企业管理和教育等有不少方面已得到实际应用,部分已经见效。还有更多项目已经构造出各种各样的数学模型,正在用实际数据进行试算,或进入考虑实用的阶段。有很多应用在本书其他作者文中已经提到,这里就不再赘述了。

### 2、系统工程有组织的研究队伍迅速扩大

近年来我国系统工程研究队伍在各个部门迅速扩大。系统工程学会近年来已经建立军事、社会经济、模糊数学和模糊系统、系统理论等专业委员会,其它如农业、矿业、

水利、信息等方面都早有专业活动，并提出成立专业委员会的申请，只是等待有关部门批准。各地方分会也纷纷建立，或正在筹建。其它兄弟学会中设立系统工程专业委员会或相应组织的也有不少。除了学会组织外，从事系统工程研究的单位，全国有近180个（截止1984年6月止），有关研究工作人员已达三千以上。近年来一些新的动向：一是国家重要军、政、科研、教育等部门纷纷成立相应机构，这将为系统工程的应用和研究走向正规化和经常化打下良好基础；二是地方上县一级机构以及地方科协一些单位对系统工程的应用和推广很感兴趣，这将为将来群众化应用打下良好基础；三是受到系统工程训练的队伍日益壮大。这方面教育部抓得最早，而且定出重点发展系统工程的学校，为我国最早培养了一批人才。我国有一些大学建立了系统工程或有关专业的系、所，开设了系统工程专业课程。培养出了一批硕士研究生。现在正在开办的研究生班，以至博士研究生的培养，将为有专业训练的系统工程专家队伍打下良好基础。另外各种类型的系统工程培训班更是不计其数，有按行业办班的，如农业、能源、军事、水利、矿业、机械等等，也有按不同工作性质办班的，如领导干部班、管理人员班、技术人员班等等；四是普及教育。通过电视台、广播电台的系统工程讲座以及各种领导短训班（如市长班）以及为中央党政机关办的新技术革命讲座中大都加有系统工程一讲。这使系统工程几乎成为有些领导企图改进管理的重要手段的同义语，以至使一些系统工程专家不得不去提醒一些人们注意到系统工程同样有其局限性，它只是一种手段而不能包打天下。

### 三、与国外比较

我国系统工程发展与国外比较首先是总的起步较晚，相差约二、三十年。其次，从实际水平相比，在理论方面讲，我国在系统科学方面研究极为薄弱。国外已经有各种学派，而我国大部分同志还处在向国外学习和掌握这方面知识阶段。值得提出的是钱学森同志一系列文章反映我国自己的特色和水平。应该看到当前国外对系统工程学科的认识比较乱和散，但是钱学森同志对系统工程的理解却要深刻得多，而且他能结合马克思主义哲学思想来认识。他的系统科学思想首先表现在他提出了一个清晰的现代科学技术的体系结构，同时他认为系统工程是组织管理的技术，把传统的组织管理工作总结成科学技术，并使之定量数值化以便运用数学方法。他认为系统工程是一大类工程技术总称而不是一个单一学科。这给系统工程一个确切的描绘，并从整个系统科学体系论述了系统工程在其中所处地位。这就为我国系统工程界统一认识打下了一定基础。与系统科学相比，在系统工程各种具体方法的研究方面，我国赶得比较快，而且有些方法的应用已经比较普遍，在某些方面，如运筹学、控制论、模糊数学等也已经发表了大量论文，而且有些文章已经达到国际水平，并在国际杂志上发表。在应用方面，我国能较熟练地将国外六十、七十年代的一些常用方法在军事、能源、农业等前面提到过的不少方面加以应用。但是从应用的规模和深度看，还有很大差距。例如，线性规划模型，国外有的考虑变量多达百万个，而我国目前最多只是几千个变量。对于确定投资项目等很有用的整数规划，国外最近已考虑到两千多个变量，而我国却还在几十个变量的水平。我国也很少应用一些内容较深的定量技术，以及国外应用较多的定性技术。此外，由于我国系统工程专

家综合知识、能力不足,往往懂经济的对数学不熟,搞数学的对经济、工程不熟,搞数学的本身专业又分得过专。而国外一些系统工程专家的知识面比我们宽得多,因而应用时能比较得心应手。我国有些项目有为适应自己特长而硬套的现象。我国现在更缺既懂各项知识,又懂组织管理的高级系统工程组织家。这在一段时间内将妨碍一些大型项目的成功。最后在计算机应用方面,国外已到了相当普遍程度,而我国系统工程界老一辈大多自己不能使用计算机,或者懂计算机的对方法及应用经验还不熟。此外,我国合用的系统工程方面配套软件不多,已引进的一些软件也开发得很不够。

我国在数据准备方面与国外相比差距也很大,数据缺乏、不准、或者使用困难,以致耗费我国系统工程工作者很大精力,甚至使一些课题难以成功。

在领导支持方面我们有有利条件,一旦领导认识后可以得到很大的支持。事实上一些中央领导已经就系统工程的应用作出了不少重要指示,他们鼓舞了我国系统工程工作者,也促使了一些部门要求应用系统工程,并为之创造了一些有利的工作局面。但是更多的仍是由于知识能力所限,往往出现操之过急,今天布置明天就想看到成果,而不了解系统工程工作需要相当长时间来进行。或者持反对态度,认为系统工程没有用途,不愿意用或持不配合态度,同样使项目难以成功。

#### 四、2000年展望

**1、在理论方面** 我国将不仅能掌握国际上一些先进的成熟方法,而且能掌握大部分系统科学的基本理论,并在某些分支形成我国的特色。

**2、在应用方面** 将利用我国计划经济的特点,在处理一些全国性的大系统工程项目(如国民经济计划系统、能源系统、全国农业规划等等)形成我国的特色,其中有些将在世界上成为重要项目。在大部分大、中型工程项目的上马、总体设计、生产组织、运行以及检验等,将全面或局部地使用系统工程中的不同方法,而且做到定量与定性的科学方法综合应用,定量方法与领导判断综合应用。

**3、在教育培训方面** 除了在大学、研究生等形成正常培养制度外,通过十多年的培养将出现一批如同现在航天部的导弹总体设计师那样的国民经济总体设计师、总体战略设计师、国防战略设计师等专家,专业研究队伍将更加扩大,首先扩大到上万,然后将以各类具体系统的系统工程师的面目出现,例如能源系统工程师、农业系统工程师、矿业系统工程师等等,其数目将数以十万计。现有的只具备专业知识的队伍慢慢由于学习系统工程后从知识专业化转向知识综合化,然后一些应用成熟的部门又将从综合化转向某些专业化,也即把系统工程紧紧与某一方面专业相结合。

**4、在与计算机结合方面** 那时极大多数系统工程工作者除了会使用计算机外,而且大部分系统工程软件都已配套,大部分模型已进入各种模型综合配套,而且能进行多人机对话的阶段。利用计算机网络系统可以彼此借用软件,讨论模型。

由于我们的知识面有限,时间又较局促,文中肯定有不少错误及不全面之处,欢迎指正。

中国系统工程学会 许国志 陈立 顾基发

## 系 统 科 学

系统科学作为科学的一个分支，在国际上，国内都已展开了广泛的讨论，特别是作为新技术革命的一个重要内容，更引起人们的关注和兴趣。然而对系统科学的认识，目前还未完全定型。这是由于系统科学的发展没有达到一个成熟的阶段，复杂系统的基本规律还没有充分被揭示；另外也由于在系统科学这个领域内工作的成员所侧重的学科很不相同，有数学，物理学，工程学，以至于生物学，社会学等等各个方面，这就使得问题的提出，概念的归纳和数学方法的选取，其侧重点都有所不同。在这种情况下，探讨一下系统科学在2000年所能发展的前景，便是一件很有意义的事情。本文的讨论是以物理学为背景，着重论述复杂系统基本规律研究的发展趋势，这是系统科学的中心议题，也是物理学发展的前沿。

系统科学以复杂系统为其研究对象。目前已经出现了很多有用的学说或理论，并应用于各个具体的系统，如信息控制系统，对抗系统，开放系统，动力系统等等。在某一种具体的学说或理论中，由于所要解决的问题不同，研究的方法不同，因此会对系统给出不尽相同的定义和研究结果。然而有一点却是相同的，它们的研究对象都是复杂系统，各种不同的学说，只是从各个不同的角度去阐明复杂系统的规律。

复杂系统的研究也是现时物理学发展的前沿。一般说来，物理学目前有三个前沿领域，在小的方面，是基本粒子，讨论 $10^{-15}$ 厘米以下的客体，目前又发现了夸克以下的可分层次，越来越显示这一领域中的可分和多层次的特点；在大的方面，是宇宙，目前已在讨论极早宇宙的起源，其时间量级在 $10^{-44}$ 秒；介于其间的是一个很广阔的领域，其横向的展开形成了各式各样的复杂系统，也成为物理学发展的前沿方向。近些年来，非平衡，非线性，非晶态的研究深入展开，促进了对复杂系统的了解。

物理学以复杂系统为其研究对象，并且形成一个前沿领域，是一件很有意义的事情。在这个领域工作的学者，例如 I. Prigogine, H. Haken, K. G. Wilson, Feigenbaum, M. Eigen, M. Suzuki 等人，都对复杂系统性质的认识，给予实质性的促进。物理学探索物质运动规律的科学方法，它在很多领域中已获得成功，也将有效地运用到复杂系统规律的探求中去。物理学比较重视在现象后面所隐藏的概念的揭示和概括，它总是相信，即使很复杂的现象，总有一些基本规律在主导着它们的运动。这些概念和规律，一旦被揭露，被认识，它们往往是非常简明而普遍适用的。物理学总是寻找最有力的数学工具去表述它们，并且以非常典型的实验来验证这些概念和规律的正确性。正由于物理学研究方法的这些特点，使得它能够在研究复杂系统的规律时成为一种活跃的力量，

并且与其它学科一起,为揭示复杂系统运动的基本规律作出应有的工作。

为了探讨复杂系统规律,研究今后发展的趋势,回顾一下物理学近些年来在这个领域中的进展是十分必要的。这些进展是与非平衡、非线性系统的研究密切联系的。

对于一个复杂的系统,特别是处于非平衡态的,给人们的印象是杂乱无章,很难把握它内在的规律。1969年,Prigogine提出耗散结构的概念是一个突破。他提出在非平衡的开放系统中,控制参数达到某一阈值时,系统会发生从无序到有序的突变。突变后的有序态便称之为耗散结构。这是一种普遍适合的概念,在许多不同的复杂系统中,尽管研究的对象有所不同,如流体,化学反应,生态系统等等,但是它们的突变机制却是一致的,并且可以用相同的数学结构予以描述。不仅如此,Prigogine及其合作者们还指出,系统发生突变前后,伴随产生的一些行为,也是很普遍适用的。例如,系统突变都要经过一个从稳定到不稳定的失稳过程,突变后的状态达到新的稳定,虽然有小的扰动也不会改变其宏观特性,这些新的态通常有一个不稳定的背景,新的态的维持要通过与外界的物质和能量的交流等等。这样一种认识的意义,是在于把物质、能量和信息(这里以序的形式出现)的运动统一起来考虑,这是前所未有的。以往物理学的研究,考察了物质运动的各种形式以及与能量的转换关系,但是并没有认真研究过物质的信息运动形式。在控制论的创始人N. Wiener的论述中,注意到了这个问题,但是在其实际问题的处理中,只讨论信息控制,并没有与物质和能量的转换。Prigogine的工作,显示了这样一种前景,这种由物质、能量、信息为基本要素的复杂系统,存在一种普遍适用的概念和规律去刻画它,如失稳,突变,涨落,分支,有序等等。这就开辟了一个很有意义的工作领域。然而,Prigogine的工作是十分初步的,在某种意义上说,他是提出了一个好课题,但根本的问题并未解决。

70年代初期,H. Haken以激光系统为背景展开了对复杂系统中合作现象的研究,后来定名为协同学。由于激光系统不存在热力学极限,所以Haken也没有采用热力学的语言去处理这个系统。他直接引入了合作系统的一些普遍适用的概念,如有序参量,自组织,突变等等,所得到的结论与Prigogine殊途同归。Haken比较早地强调了合作系统的普遍适用的共同特性,他列举了物理系统、化学系统、生态系统、电子回路系统,以至于社会经济系统,它们的协同现象是有统一的概念和规律的。在最近的一些著作中,Haken把计算机系统也包括了进去,讨论了个别组件与整机的关系,这就使得基本规律的研究与实际工程系统工作的联系更为密切。由于Haken把协同学看作是复杂系统所遵循的共同规律,所以也比较明确地提出了要寻找第一原理这样的工作目标,但进展不是很多,目前只提出了支配原理(Slaving Principle)。其意思是,在复杂系统中有二类状态变量,快变量和慢变量,它们的地位是不同的,慢变量起控制和支配的作用。寻找第一原理这一命题的提出,虽然目前没有解决,但是对于复杂系统基本规律的探求和概括,显然起着很好的促进作用。Haken上述的概念和思想,都能有具体的数学表述形式,特别在使用了支配原理以后,能够把多变量体系的方程大大简化,可有效地应用于实际系统中去。

70年代的中期,日本的R. Kubo和M. Suzuki从另外一个角度讨论了复杂系统的基本规律问题,他们在Prigogine等人工作的基础上,企图以一般的观点去概括突变现象所服

从的规律。他们采用了随机方程作为数学处理的形式，得到了复杂系统从无序到有序的转化是由三个因素控制的，即非线性特性，随机因素和起始条件。这种概括是否能成为一种原理式的表述尚需要更深入的考虑，但是他们的研究成果给出了这样的概念：在物质的信息运动的复杂系统中，非线性的多重反馈是信息量突变的决定性因素。日本学者的工作给出了突变过程的刻划，这对于理解信息量突变时各种因素的相互作用有非常重要的启示。

也是在70年代，M. Eigen 从生物学的背景上提出了超循环的理论。超循环是大分子集团自组织的一种理论。大分子集团依藉这种超循环的组织，可以形成稳定的结构，并且能进化变异。这种组织实际上是耗散结构的一种具体形式，只是在分子大分子集团的层次上予以具体化了。这种超循环结构的出现，除了进一步论证稳定、突变、自组织这些共同的概念外，还对于大信息量系统的储存方式给以有启示的证明。在由循环套着循环的这种组织方式中，可以使信息量的储存成千上万倍地增加，而且误差很小。信息系统的变异是通过误合来实现的，小的误差使变异后的物种成为一个稳定的新种。

70年代中众多概念的发现和揭示，使人们对于复杂系统的认识深化，到达总结规律的程度，于是在70年代末便召开了二次大型的国际会议，来总结这个领域的成就。在此以后，除了更进一步地发展上述已探明的概念外，一个突出的进展便是对混沌(chaos)现象的认识。

混沌现象是70年代末，80年代初所认识的一种现象。它是复杂系统中另一类有序的状态，完全不同于自组织的那种有序。混沌现象完全失去了稳定的结构和周期的特性，所以无法用描述自组织系统的语言去描述它。然而在表面上看来是杂乱无章的混沌现象中，却存在着某种结构或序，这是一种无穷嵌套的自相似结构，并且相空间任意相邻二点呈现指数发散。混沌现象首先由 Feigenbaum 在离散的非线性映射系统中发现。然后很快地在许多实际系统中讨论，例如流体，激光，电子回路等等。有趣的是，在混沌现象中存在着一些普适常数，例如反映分岔序列性质的 Feigenbaum 常数。混沌现象所揭示的复杂系统非线性特性提供了一组新的概念，这些概念有待深入地去发掘。

以上是从物理学的角度回顾了近年来对复杂系统认识的进展，特别是一些新概念的形。可以看出，这个物理学是很大地超出了它原来意义上的范围，它不仅涉及化学、生物学，而且还联系到信息、控制，以至于某些社会科学的范围。对复杂系统认识的深入，乃是多种学科研究工作的共同成果。

2000年的系统科学会有什么样的发展前景呢？从上面所述可看出，这十几年来对复杂系统的理解进展很快，势头不减，涉及的都是一些实质性的概念。世界上越来越多的研究集体投入到这个领域中来。这些都是很好的兆头，说明在这个领域中的研究工作还会有更大的进展，特别是会有一些定性理论出现，使人们获得新的概念突破。今后十几年，粗略地估计一下，可能会在四个方面获得发展，即概念和基本规律的探索，新数学工具的引入和采用，对典型的复杂系统深入研究和实验工作的展开。这几个方面的工

作，如果配合的好，可以获得比较大的突破，使人们对复杂系统的认识达到一个新的高度。

现在分别论述一下可能的发展。概念的探索是最基本的，其目的在于寻找出复杂系统内在的联系。概念的发展需要一些生长点，它们是学科进展中最活跃的那些部份，我们可以提出如下一些内容。

**对称破缺** 从复杂系统的突变中提炼出对称破缺的概念，是认识上的一种提高。突变现象有许多具体表现，略去其细节不顾，本质的改变是突变前后状态对称性的变化。一般从一个比较对称的状态突变到比较不对称的状态，使系统的有序程度或信息量增加。虽然提出了对称破缺，但是目前对它知之甚少，也缺乏一种有力的数学工具作定量的刻划。在复杂系统中，非线性特性如何控制对称性的改变，是今后的一个重要课题，会取得进展。非线性放大作用会被重新考核和估计。迄今为止线性放大优越于非线性放大的看法可能是有局限性的，这些问题的澄清都是密切联系于对称破缺这一概念的。

**自组织** 在耗散结构和协同学的讨论中，似乎对自组织已经有了很多认识，但实际上只是一些最简单的自组织情况，甚至可以说是一些模型化了的例子。实际的系统要复杂的多，大信息量系统信息的积累、储存、可靠运行和稳定，是一个复杂的自组织的问题，将在今后的研究中给出新的概念。即使简单一些的自组织系统建立的充分条件，在 Prigogine 的理论中也没有完全讨论清楚，将来会有更深刻的理解。自组织系统的分类和随时间的变异的问题，目前仅积累初步的知识，将会有更完整的认识。

**混沌** 混沌现象目前处于一个现象认识阶段，大量的计算机结果给出了混沌的图象、普遍适用的常数，但是没有达到一个系统理解的程度。引入适当的数学工具对混沌现象进行分析是必然展开的一个内容，目前的知识甚少。在近可积系统有 KAM 定理。今后对混沌现象也会有定理式的表达方式。混沌现象与自组织的联系和转化，目前只是停留在周期和非周期性这样一些概念上，以后可能会有更进一步的理解。混沌现象出现的普遍适用的常数是饶有兴趣的，它一定会揭示非线性系统所隐含的某些本质特征。由混沌及一些其它现象所引起的分数维数的讨论，无论对于数学或者物理都将提供新的内容。

**分岔** 无论自组织和混沌都和分岔密切联系。R. Thom 给出了七类基本突变来描述这些分岔，但是有很强的条件，要有势的存在，控制参数不超过 5 个。实际系统的分岔行为远超过了 Thom 所概括的类型，特别是一些无势系统有很具体的实际背景。这些图象的研究，分类，将是今后重要的发展方向。用几何的方法来处理分岔，临界点，这种工作还仅仅是刚刚展开，将会进一步给出一些令人感兴趣的概念和结论。

**环境涨落和温度涨落** 通常所讨论的开放系统，处理的是一种定常的外部环境，例如恒定的物质流，热量流等等。外部环境如果是变动的，必然会对突变现象带来不可忽视的影响，例如突变点的更动，突变方式的转化等等。这一类现象用环境涨落的语言来进行讨论和计算，也仅是最近几年的事情，估计会有很多发展，因为这与实际系统的性质更为接近，研究环境的变化与系统内在的非线性的相互影响，将会给出许多新鲜的知识 and 结果。温度涨落的问题更是最近一、二年才开始研究的。它对于处理爆炸、燃烧系统特别有利，也将会发展它的概念并给出有益的启示。

**亚稳态和弛豫过程** 对于突变现象,需要了解它转变的细节,这是由弛豫过程的研究来实现的。这种细节的了解,对于非线性相互作用的认识甚为重要。亚稳态是弛豫过程中的一个环节,它在复杂系统中普遍出现,有许多独特的性质。现在弛豫过程的研究还只能处理一些比较简单的系统。比较复杂的弛豫现象的机制,今后会有较多的发展。多重亚稳态以及它们之间的跃迁会与生命现象有很密切的联系,这会在今后一段时间得到充分的研究。

**孤波** 指的是耗散系统中的孤波,反映了非线性系统特有的传播方式,实际的例子如爆炸后冲击波的波前,生长中的细胞壁等等。这种传播方式的形成,是系统的非线性特性与扩散方式两种因素相互影响,相互消长的结果。这种孤波现象在复杂系统中很普遍,目前只是定性地了解。对孤波的深入研究,是理解复杂系统规律的一个重要侧面,以后会有更多的开展。

上面所论述的题目都是概念发展的生长点,估计在今后的时间内会得到重要的进展。与这些概念发展的同时,复杂系统的研究越来越感到需要新的数学形式,这也将是2000年系统科学发展的一个重要方面。数学形式的探索可能是多种方式的,并且都会取得一定的成效。这里只是对上述概念发展有较多联系的那一部份数学作一些发展的设想。

复杂系统的研究与实际问题联系密切,所以总是要用到方程。包括常微、偏微、随机方程等等,从不同的层次去描述复杂系统的发展,也可以采用离散的差分方程。现在的问题是复杂系统在本质上是是非线性的,利用我们通常的数学手段,很难从解方程中获得完整的信息。线性近似的方法虽然使求解变得容易,但是得到的解很不可靠,很可能丢掉了非常重要的部份。对称破缺的概念给了我们这样的启示:我们不需要详细了解方程解的具体分析结果,只要知道突变前后对称性变化的程度就可以了。这种对称性的分析虽然也属于方程定性理论的范围,但是目前数学上的处理很不完善。最近Suzuki等人用李代数的方法处理方程的对称性给人带来启示,预期这种方法今后会有更多的发展。即采用李群,李代数结构将所讨论的方程分类,每一类方程有一个确定维数的李代数结构,系统的非线性或线性的性质通过代数结构的性质展现出来。另外一个重要的发展前景是将微分几何的方法系统地引用到分岔问题上来,这在突变理论、动力系统理论等方面已经做了很多工作,今后需要处理一些更复杂的情况,包括混沌现象的定性描述。整体微分几何的技术今后会越来越重要,也许会有这样的前景,即目前用一些近似计算所获得的对非线性系统的了解,会通过微分几何的研究得到清晰而明确的解释。

计算机的数值计算,和常规的一些近似手段,对于以非线性为特征的复杂系统的处理仍是重要的。虽然工作量比较大,处理方式上也不一定有很多新的东西,但是由于它总能够给出某个方面的信息,在相当长的时间内总还是一种基本的手段。其中奇异扰动法会有更广阔的应用领域。

最后来估计一下典型系统和实验研究可能的发展。在探索物质运动基本规律的时候,选择一些特定的典型系统进行研究,做比较详细而透彻的计算,同时又设计一些实验进行验证或启发思维,这些比较成型的研究方法,对于复杂系统的处理甚为重要。需要选择一些简单而又能比较充分地反映复杂系统非线性的特点,找出它们的运动变化规律,再推广到更为复杂的情况中去。从前一段的情况来估计,以后的十几年内,主要在

六种典型系统中进行这样的研究，即流体系统、激光系统、化学反应系统、生命系统、电子回路系统和碰撞系统。这些系统都有它们各自独特之点，不会完全替代，例如流体系统既有大量的以往工作的积累，又有很密切联系实际的问题；电子回路系统能够模拟多种复杂系统的结构，并且简单易行，便于控制；生命系统中包括微观的分子生物体系以及宏观的生态系统，都会给复杂系统的研究提供极为重要的信息；碰撞系统是人为地制造一个远离平衡的条件，它对于研究弛豫过程和多重态跃迁是特别有利的。

实验的工作目前是处于刚刚开始阶段，主要是在流体、电子回路和激光方面，工作也还比较零散。但估计在今后一段时间内，随着复杂系统概念研究的深入，实验工作会大大加强，无论在数量上和质量上都会有一个飞跃。这里面电子回路，包括计算机回路的实验工作有着很大的潜力，只要设计思想比较精巧，是可以做出很有意义的工作来的。

我国的系统科学队伍是由数学、物理学、工程学、生物学等各个方面的人员所组成的。这几年来，研究工作有了很多进展，对于世界上的动态，基本上是了解的，并且开始酝酿有我们自己特点的一些想法。这支队伍如果组织的好，工作比较协调，在系统科学的研究和创新方面是能够有所为的，有可能比较快地赶上或达到国际水平。

以上所讨论的，仅仅是从物理学近些年来展现的一些活跃点去估计复杂系统这个领域今后可能的发展。侧重点是基本概念和规律的研究，或许能够给系统科学的发展提供一些参考。系统科学理论处理的途径不止一种，对于其他的理论方案，就不在本文中进行讨论了。

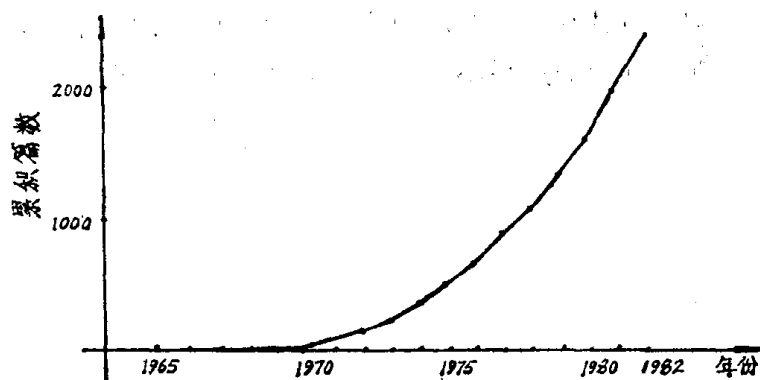
北京师范大学 方福康

## 模糊数学与模糊系统

在研究和处理系统的模糊性时产生了一门新的数学——模糊数学，国外通称为“模糊集与系统”。

### 一、国际敏感的学科

根据R. R. Yager在一篇文章中的统计数字，模糊数学问世以来文献的增长情况如下图所示。



到1982年底，他所统计的文献总数是2410篇。不久，A. Kandel所著Fuzzy Techniques in Pattern Recognition一书末尾所附的模糊数学文献又达到3064篇。他们的统计还是不完全的。

目前世界上的模糊数学杂志有：International Journal of Fuzzy Sets and Systems；“模糊数学”杂志（中国），快报有 Bulletin for Studies and Exchanges on Fuzziness and its Applications (FUSEFAL)。

国外已出的专著、论文集已有十余本。

国际会议不胜枚举。从1982年9月到1984年9月，两年内共计召开：

(1) 大型模糊数学国际会议2次

一是1983年7月18日至21日在马赛召开的“模糊信息、知识描述和决策分析”会议 (Symposium on Fuzzy Information, Knowledge Representation and Decision Analysis)；一是1984年7月22日至26日在夏威夷召开的“第一届模糊信息处理国际会议”

(The First International Conference on Fuzzy Information Processing).

(2) 跨国的中、小型学术会议和活动8次。

其中在维也纳召开2次,在布鲁塞尔、Železny(捷克)、伦敦、牛津、波兹南、北京各召开一次。在北京召开的是中美电力工程与模糊集双边会议(The First SINO-AMERICAN Symposium: Power Engineering and Fuzzy sets),由中国电机工程学会与北美NAFIP联合举办,时间是1984年7月14日至21日。

(3) 北美模糊信息过程协会(NAFIP)1983、1984年各举行年会一次。

(4) 欧洲工作组(EWG)会议次数统计不清,每年都有三次以上的学术会议活动。

(5) 日本(东京)模糊系统工作组(JFS),1983、1984年各举行年会活动一次。

(6) 在其它国际学术会议中举行模糊集与系统分组会议9次。其中,在第二届数学为人类服务国际会议(2th World Conference on Mathematics of the Service of Man)上有58篇模糊集与集统的论文;在控制论与社会国际会议(International Conference on Cybernetics & Society)上有3个Fuzzy讨论会;在国际人工智能国际会议(IJCAI)、在几次多值逻辑国际会议(MULVAL)上都有模糊集的专门讨论会;…

加在一起,两年中模糊数学的国际学术活动超过了20次,平均每年超过十次!

这些会议的内容,突出的是模糊数学与信息革命的联系。有的会议名称是“模糊信息处理”,有的会议的专题是“模糊集与第五代计算机”。从国家阵容看,主要是北美(NAFIP)、欧洲(EWG)和日本。这三方面再加上中国被认为是国际模糊集与系统发展的四支主力。苏联很少国际交往,但苏联科学院与苏联高教部于1980年9月29日至31日在里加召开了一次名为“模糊环境下备选方案的选择模型”(Models of choice of Alternatives in a Fuzzy Environment)的会议,有62篇论文宣读,反映了苏联官方对该领域的重视和研究实力。

上述国际动向表明,模糊数学是国际上的一个极其敏感的学科。它在当代信息革命中占有特殊重要的地位。

## 二、模糊系统与模糊数学

在实际处理一个系统时,尤其是处理有人的因素参与和发生影响的系统的时候,普遍地存在着一种困难,这种困难不是来自测量工具或手段的不精确,而是来自被测量对象在描述上所存在的“病义”(ill definition)。尽管前者与后者有联系,但又无法等同起来。这里所谓的病义是指一个词或概念缺乏明确的定义或分明的外延。例如,医学系统中关于各种疾病的描述本身都是有“病”的。什么叫“肝炎”?在所测试的几项指标中,即使将各项测量数字搞得十分准确,也无法完全判定是非;因为在“肝炎”与“非肝炎”之间并不存在一条明确的分界线。国外用“病义”二字来称呼外延不分明的定义

和概念，并不是否定这些定义和概念在科学中使用的价值。可能除了数学外，其它学科中所使用的定义和概念都是没有分明外延的。国外用“病”字来形容这样一类定义，无非是想表达这样一种苦衷：用精确的数量化方法去处理一个充满着“亦此亦彼”性质的现实系统的时候，总要遭遇到这种“通用性”的困难。

举一个生活中的例子。当买布做上衣时，往往根据身長确定买几尺布。做为一个确定系统来处理，把身長 $x$ 当输入，布长 $y$ 当输出，响应函数是一个确切的映射 $r: X \rightarrow Y$  ( $X$ 、 $Y$ 分别表示身長和布长的可能值域)，输入、输出分别是 $X$ 和 $Y$ 中的确定元素。但是，如果一位母亲要给千里以外的儿子亲手缝制一件棉袄，她只能大致估计一下儿子现在的身長，“大约六尺”。她应该买几尺布呢？我们还可以设想别的一些情况，于是，量体买布问题便会出现以下几种类型：

(1) 身長 $x$ 是一个“大约”数字，映射 $r$ 是确定的；

(2) 身長 $x$ 是一个精确数字，“映射” $r$ 是“大约的”；

(3) 身長 $x$ 是大约的，“映射” $r$ 也是大约的。

这里，“大约”二字理解为某种度量概念的病义化。于是，这个譬喻便大致说明了现实系统在输入、输出关系上所经常面临的“病义”性问题。至于在系统的状态及其转移方面所存在的这类问题就更多了。

概念外延的不分明性就叫做模糊性。含有模糊性的系统叫做模糊系统。现实的系统大多都是模糊系统。模糊系统要求有一种新的分析处理的数学理论和方法，这就是模糊数学。

模糊性是客观差异的中介过渡性所引起的划分上的一种不确定性。人的性别是一种客观差异，由它产生男人和女人的划分，形成“男”、“女”的概念。概念总是在对比中形成的。从数学上来抽象，概念的形成乃是一个划分过程。把差异的一方与另一方区别开来，形成一定的范畴。符合概念的全体对象所构成的集合叫做这个概念的外延，凡此集合中全体对象所共有而在其外又都不具有的那些性质的全体，叫做这个概念的内涵。这些性质也就是通常所说的“本质属性”。划分是一种最简单、最基本的判决过程。概念是一种划分，量测也是一种特殊形式的划分。

水到 $0^{\circ}\text{C}$ 以下要结冰。象这样一些具有突变性质的差异，具有比较明显的界面，造就出确定的划分，形成确切的概念或度量。但是，“辩证法不知道什么绝对分明和固定不变的界限，不知道什么无条件的‘非此即彼’，它使固定的形而上学的差异互相过渡，除了‘非此即彼’，又在适当的地方承认‘亦此亦彼’，并且使对立互为中介”。“一切差异都在中间阶段融合，一切对立都经过中间环节而相互过渡”，(恩格斯)。“秃”与“不秃”是不能以某一个头发根数来分界的，“有矿”与“无矿”、“健康”与“不健康”也都找不到明确的界面。从差异的一方到差异的另一方，中间经历了一个从量变到质变的连续过渡的过程，这就叫做差异的中介过渡性。由于中介过渡性的普遍存在，模糊性也就渗透在一切识别和判决过程之中。

在谈到模糊性的时候，不能不注意到它和随机性之间的区别和联系。随机性是由于条件不充分而造成的结果的不肯定性，它反映了因果律的一种破缺；模糊性是由于外延不分明而造成的判断的不确切性，它反映了排中律的一种破缺。随机试验是为考察随机

现象中条件与结果之间所具有的连带关系而作的试验，它可以在心理测量范畴以外通过物理的或其它客观的测量过程来实现；模糊试验是为考察模糊性现象中对象与概念之间所具有的隶属关系而作的试验，它常常要通过判决者的回答来实现，包含着心理测量的过程。在人文系统（有心理因素参与并发生影响的系统）中，那些与事物的意义和判断有牵连的起伏和波动，往往不再遵守概率的频率稳定性规律，用概率方法去描叙和处理便会失灵。这是模糊系统所面临的新问题。在复杂系统中，模糊性也会伴随着复杂性而产生。L. A. Zadeh从实践中总结出了这样一条互克性原理：所面临的系统越复杂，人们对它进行有意义的精确化的能力便越低。当复杂性超过了一定的阈值，模糊性便成为不可避免的东西。因此，复杂系统往往就是模糊系统。

经典数学将模糊性扬弃于数学模型的门外，扬弃得越多，数学回到实际时所遇到的阻力也就越大。当今随着科学及计算机技术的发展，机器智能要求计算机必须逐步吸取人脑对复杂事物进行模糊识别的特长，模糊性是再也无法回避的了！

Zadeh提出隶属程度的概念，用它来刻划处于中介过渡的事物对差异一方所具有的倾向性，从“亦此亦彼”中提取了“非此即彼”的信息。用这种思想来看待现代数学的基础——集合论，他把元素对集合的关系从绝对的隶属与否，改为一定的隶属度。当隶属度为1或0时，表示绝对地隶属或不隶属；当隶属度取 $(0,1)$ 中的小数值时，便表现了亦此亦彼的性质。由此，他提出了模糊集合论，标志着模糊数学的诞生。

应当从这样的高度来看待这门新学科：模糊数学的产生是历史的必然，它反映了信息革命的迫切需要，它是为信息革命而作的一项必需准备，它将为信息革命提供一种新的富有魅力的数学工具和手段。之所以这样说，有以下三方面的理由：

1、要使机器“理解”和接受人的自然语言，必须利用模糊数学。

人类彼此交换信息必须依靠语言。形式语言在文法方面取得了比较深入的研究成果，但在语义方面却遇到实质性的困难。例如，顾客要“买一件新奇、大方的玩具作礼品”，要使机器代客选购，必先让机器“理解”这句话的含义。机器不可能（起码在近十五年内）像人一样地具有对“玩具”、“礼品”、“新奇”、“大方”等词的知觉形象。所谓“理解”，是指它们能够像人一样地对这些概念作出判断。输入一个商品符号，机器能够判断它是否符合上述词义。如果能够给出一个二元关系 $S \subset X \times T$ ，这里 $X$ 是对象符号集， $T$ 是词的符号集，对任意 $x \in X$ 及 $t \in T$ ，若 $(x, t) \in S$ 便判定“ $x$ 是 $t$ ”，否则便判定“ $x$ 不是 $t$ ”，只要 $S$ 给得恰当，使所给判定与人脑相一致，我们便称机器对 $T$ 中的词在 $X$ 范围内是已经理解的了。可惜得很，这种二元关系在现实生活中常常是给不出来的。这首先是因为人的判断本身具有不确切性。看一件商品是不是玩具，还好下判断，要问适不适于作礼品就不大好说了，至于什么叫新奇、大方就更不好说。自然语言的词，用外国人的话来说，几乎都是“病义”词，这些词所代表的概念都是模糊概念，对象与词义之间的对应关系不能用 $X \times T$ 的普通子集 $S$ 来刻划，它应该是一个模糊子集 $S$ 。模糊数学给出了一套表现自然语义的理论和办法，使部分自然语言转化成机器可以“理解”和接受的东西，大大提高机器的活性。从这个意义上讲，模糊数学在谱写一种新的“信息论”。香农的信息论研究信息量的传输，新的信息论则研究信息内容和意义的翻译和传递。