

23  
6

高等学校教材

# 动态大系统方法导论

席裕庚



国防工业出版社

# 动态大系统方法导论

席裕庚

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书较全面地介绍了动态大系统的建模和控制领域内比较成熟的重要方法。全书共分六章，内容包括动态大系统的建模与结构分析、模型简化、动态大系统的递阶控制、分散控制以及动态大系统稳定性、可控可观测性的分析。

本书系动态大系统理论和方法的导论性教材，取材注意结构的完整性和内容的典型性，重点在于针对动态大系统的特点，从方法的角度介绍处理其复杂性的有效手段。在编写上，注意讲清问题的背景、解决的方法和思路，易为初学者接受。

本书可供自动控制、系统工程等专业的研究生或高年级学生选修，也可供从事大系统实践或研究的广大科技人员参考。

### 动态大系统方法导论

席 裕 庚

责任编辑 陈洁

国防工业出版社出版、发行

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张17<sup>1</sup>/<sub>2</sub> 403千字

1988年11月第一版 1988年11月第一次印刷 印数：0,001—2,080册

ISBN 7-118-00356-5/TP·46 定价：3.50元

## 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐、由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

## 前 言

本教材系按电子工业部制定的工科电子类专业教材1986~1990年编审出版规划,由计算机和自动控制教材编委会自动控制编审小组组织征稿、评选并推荐出版的。

本教材由上海交通大学席裕庚编写,北京工业学院吴沧浦审阅。

七十年代以来对大系统理论和方法的研究,已取得了丰硕的成果。大系统的理论和方法,不仅在工业、社会经济等许多领域内得到了实际应用,而且极大地丰富了高维复杂系统控制的方法论宝库。本书作为导论性的教材,主要介绍动态大系统的建模与控制这一领域内比较成熟的处理大系统复杂性的方法,旨在为研究生和从事大系统实践的科技人员深入进行这方面的专题研究奠定基础。

本教材共分六章。第一章绪言,引入了大系统的概念,指出了大系统研究区别于多变量系统控制理论的主要特点。第二章动态大系统的建模与结构分析,从大系统的特点出发,介绍了分解、简化原则和结构分析方法在动态大系统建模过程中的应用。第三章动态大系统的模型简化,介绍了大系统在时域中的集结、摄动简化方法和频域中的主要模型简化方法,分析了这些方法中共同的结构思想。第四章动态大系统的递阶控制,阐述了分解在大系统控制中的必要性和分解-协调的基本原理,介绍了按空间、时间、时标、决策层次等不同方式对动态大系统实现分解的各种递阶控制的方法原理和算法实现。第五章分散控制,引入了分散控制和非经典信息模式的概念,并从模态控制和优化控制的角度分别介绍了分散控制系统的镇定、极点配置、鲁棒伺服控制和次优设计的方法,简述了分散随机控制问题。第六章动态大系统的稳定性、可控性和可观测性,从克服大系统高维性引起的研究结构性质的困难出发,介绍了用组合系统方法分析大系统稳定性的李亚普诺夫方法和输入输出方法以及对大系统可控性可观测性的判别方法。

本书是在参阅、整理了国内外大量文献资料和总结了编者近年来教学、科研成果的基础上编写而成的。选材的重点在于说明方法原理。书中配有相当数量的例题和习题,有助于读者加深理解。

本教材可作为从动态系统的经典控制理论——现代控制理论——大系统控制理论的最后一环。在学习本教材时,读者应已具备“现代控制理论”、“线性系统”、“最优控制”等方面的基础知识。本教材参考学时数为60学时,通过适当组织有关内容,亦可按40学时安排教学。

本教材的编写得到了中国科学院学部委员、上海交通大学张钟俊教授的指导和关心,北京工业学院吴沧浦教授认真审阅了全文,提出了详细的修改意见,西安交通大学万百五教授对本书初稿讲义也曾提出不少宝贵意见,编者在此向他们表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,对于书中存在的缺点错误,衷心希望广大读者批评指正。

编 者

一九八七年十月

于上海交通大学

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第一章 绪言                     | 1  |
| 1.1 大系统的基本概念               | 1  |
| 1.2 大系统理论和方法的特点            | 3  |
| 第二章 动态大系统的建模和结构分析          | 8  |
| 2.1 系统的模型                  | 8  |
| 2.1.1 模型的一般概念和分类           | 8  |
| 2.1.2 大系统的数学模型和结构模型        | 9  |
| 2.2 动态大系统的数学建模             | 12 |
| 2.2.1 动态大系统数学模型的特点和建模基本原则  | 12 |
| 2.2.2 动态大系统数学建模的机理及一般步骤    | 13 |
| 2.3 动态大系统数学建模实例            | 16 |
| 2.3.1 天然气传输网络中气体流动过程的数学建模  | 16 |
| 2.3.2 催化裂化装置的数学建模          | 19 |
| 2.4 计算机在大系统数学建模中的作用        | 21 |
| 2.4.1 动态大系统的数字仿真           | 21 |
| 2.4.2 动态大系统的计算机辅助建模        | 25 |
| 2.5 动态大系统的结构分析             | 28 |
| 2.5.1 结构模型在大系统分解中的作用       | 28 |
| 2.5.2 输入输出可达性和结构矩阵的一般秩     | 31 |
| 2.5.3 结构可控性及其在确定可行控制方案中的作用 | 37 |
| 2.6 小结                     | 40 |
| 习题与思考题                     | 41 |
| 第三章 动态大系统的模型简化             | 43 |
| 3.1 使用集结概念的模型简化            | 44 |
| 3.1.1 动态精确性集结的形式、实质及意义     | 44 |
| 3.1.2 精确集结法                | 47 |
| 3.1.3 模态集结法                | 50 |
| 3.1.4 链式集结法                | 56 |
| 3.2 使用摄动概念的模型简化            | 62 |
| 3.2.1 正规摄动法                | 62 |
| 3.2.2 奇异摄动法                | 69 |
| 3.3 动态大系统在频域中的模型简化         | 79 |
| 3.3.1 帕德近似法                | 79 |
| 3.3.2 劳斯近似法                | 88 |
| 3.3.3 混合方法                 | 92 |
| 3.4 小结                     | 98 |

|  |            |
|--|------------|
| 习题与思考题 .....                           | 100        |
| <b>第四章 动态大系统的递阶控制 .....</b>            | <b>103</b> |
| 4.1 大系统的递阶结构和分解-协调原理 .....             | 103        |
| 4.1.1 大系统的递阶结构 .....                   | 103        |
| 4.1.2 多级递阶结构中的分解与协调 .....              | 106        |
| 4.2 线性连续大系统的开环递阶控制 .....               | 109        |
| 4.2.1 目标协调法 .....                      | 110        |
| 4.2.2 关连预估法 .....                      | 115        |
| 4.2.3 两种方法的应用举例和比较 .....               | 119        |
| 4.3 线性连续大系统的闭环递阶控制 .....               | 121        |
| 4.4 线性离散大系统的递阶控制 .....                 | 125        |
| 4.4.1 离散时间系统的关连预估法 .....               | 126        |
| 4.4.2 离散时间系统的三级分解-协调 .....             | 129        |
| 4.4.3 有时滞线性离散系统按时间方向的分解-协调 .....       | 133        |
| 4.5 非线性大系统的递阶控制 .....                  | 137        |
| 4.5.1 非线性非可分问题的分解与协调 .....             | 137        |
| 4.5.2 非线性大系统的共态预估法 .....               | 142        |
| 4.6 动态大系统的时标分离控制 .....                 | 145        |
| 4.6.1 双时标动态大系统的控制 .....                | 145        |
| 4.6.2 动态大系统按空间和时标双重分解的递阶控制 .....       | 149        |
| 4.7 动态大系统的多层递阶控制 .....                 | 151        |
| 4.8 小结 .....                           | 155        |
| 习题与思考题 .....                           | 158        |
| <b>第五章 分散控制 .....</b>                  | <b>160</b> |
| 5.1 分散控制的概念 .....                      | 160        |
| 5.1.1 集中控制与分散控制 .....                  | 160        |
| 5.1.2 非经典信息模式 .....                    | 161        |
| 5.1.3 分散控制中的最优性概念 .....                | 164        |
| 5.2 分散控制中的固定模 .....                    | 167        |
| 5.2.1 集中控制可控性与可观测性的意义 .....            | 167        |
| 5.2.2 固定模的概念和计算方法 .....                | 169        |
| 5.2.3 固定模的代数特征 .....                   | 172        |
| 5.3 分散化镇定和分散化极点配置 .....                | 177        |
| 5.3.1 分散化镇定和分散化极点配置的充要条件 .....         | 177        |
| 5.3.2 分散化镇定和分散化极点配置的顺序设计 .....         | 180        |
| 5.3.3 互联系统的分散化镇定 .....                 | 184        |
| 5.4 分散化鲁棒控制 .....                      | 189        |
| 5.4.1 问题的提出 .....                      | 189        |
| 5.4.2 对象已知时分散化鲁棒控制存在的充要条件 .....        | 191        |
| 5.4.3 对象未知时分散化鲁棒控制存在的充要条件和顺序设计方法 ..... | 195        |
| 5.5 分散控制系统的次优设计 .....                  | 202        |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 5.5.1 利用参数优化的分散控制器的设计 .....         | 202        |
| 5.5.2 利用相互作用模型的分散控制 .....           | 206        |
| 5.5.3 具有重叠信息集合的系统的分散控制 .....        | 210        |
| 5.6 分散随机控制 .....                    | 217        |
| 5.6.1 一步时延和多步周期分享模式 .....           | 219        |
| 5.6.2 固定结构控制器 .....                 | 220        |
| 5.7 小结 .....                        | 225        |
| 习题与思考题 .....                        | 227        |
| <b>第六章 动态大系统的稳定性、可控性和可观测性 .....</b> | <b>230</b> |
| 6.1 组合系统的纯量李亚普诺夫稳定性分析 .....         | 230        |
| 6.1.1 李亚普诺夫稳定性和 $M$ 矩阵 .....        | 230        |
| 6.1.2 用纯量李亚普诺夫函数分析大系统的稳定性 .....     | 233        |
| 6.2 组合系统的向量李亚普诺夫稳定性分析 .....         | 240        |
| 6.2.1 比较原理和向量李亚普诺夫函数 .....          | 241        |
| 6.2.2 组合系统的向量李亚普诺夫稳定性分析 .....       | 243        |
| 6.3 连接稳定性 .....                     | 247        |
| 6.3.1 连接稳定性的概念及一般分析 .....           | 247        |
| 6.3.2 线性互联系统的连接稳定性分析 .....          | 249        |
| 6.4 组合系统的输入输出稳定性 .....              | 252        |
| 6.4.1 输入输出稳定性和小增益定理 .....           | 252        |
| 6.4.2 组合系统的输入输出稳定性分析 .....          | 256        |
| 6.5 组合系统的可控性和可观测性 .....             | 258        |
| 6.6 小结 .....                        | 266        |
| 习题与思考题 .....                        | 268        |
| <b>参考文献 .....</b>                   | <b>269</b> |



# 第一章 绪 言

## 1.1 大系统的基本概念

七十年代以来，由于生产过程自动化向综合自动化方向的发展，以及计算机在国民经济、科学研究和社会生活各方面的广泛应用与通信技术的进展，现代化社会中出现了许多实际的大系统，如大型工业企业、大电力网、交通网、通信网、计算机网、大型商业、医疗、公共服务中心等等。对于这些系统，已不可能沿用经典的理论和方法来进行控制和管理。因此，大系统理论及其应用受到了广泛的重视和研究，已成为控制、信息、系统、计算机和管理等学科的重要研究内容。

研究大系统，首先要了解什么样的系统才能称为大系统，但至今对此尚无统一的定义，这是因为不同专业、不同学科的人员对于大系统可以有不同的理解。为了获得大系统的概念，我们可以首先看几个典型例子。

### 〔例1-1〕 连续化工过程的计算机控制与管理系统

图1-1 是某连续化工过程计算机控制与管理系统的方框图。这一系统的功能，在上层为工厂管理，在下层为过程控制，过程控制中又分为监督控制与定值控制两级。定值控制级主要是通过常规仪表和数字计算机保证化工过程在设定条件下运行，被控的是流量、温度、压力等过程量。在监控级，除了对实际生产过程中的数据进行采集和监督、报警外，还担负有优化控制的任务，即在工作环境有所变动时，能为定值控制设置新的工作点，以保证整个系统运行在最优状态。工厂管理级的任务则是对生产进行规划、调度，实现生产安排的最优化。

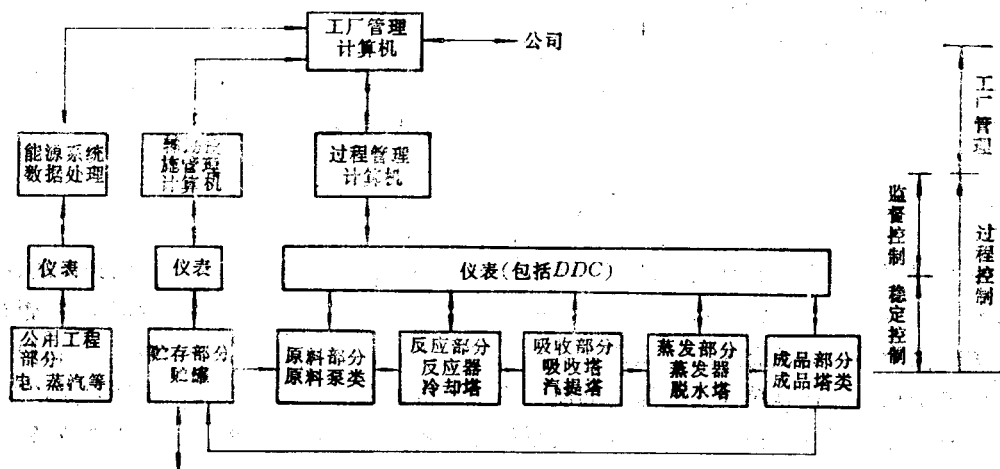


图1-1 连续化工过程的计算机控制与管理系统

可以看出，这样一个系统是由许多局部子系统组成的，在子系统之间，不但有物质、能量的流通，而且大量的信息流通，子系统之间存在着复杂的关连。系统的外部环境和内部干扰是多变的、不确定的。系统在不同的层次上完成不同的任务，具有综合的功能，而系统所要达到的目标，例如产量高、质量好、能耗少、运行成本低、环境污染小等等，是多种多样的，必须对其进行协调。

### 〔例1-2〕 天然气传输网络控制系统

图1-2画出了某天然气传输局部网络。这一局部网络从A、B两处输入天然气，它们来自直接供气单元或网络的其它部分，并在C处输出一定量的天然气给后续网络。网络中存在着不同类型的单元，如管道、阀门、调节器、压缩机、用户等。这些单元以一定的拓扑结构相互连结。控制的目的是，要使传输成本最低，并保证供应用户具有一定压力的天然气。虽然用户的需求根据生产和生活的规律呈现出如图右上方所示的日统计规律，但随机因素的影响还是很大的。在用计算机控制这一系统时，需要完成采集数据、预测仿真、控制优化等一系列任务。这个系统同样存在着结构的复杂性、环境及干扰的不确定性、功能的综合性以及目标的多样性。

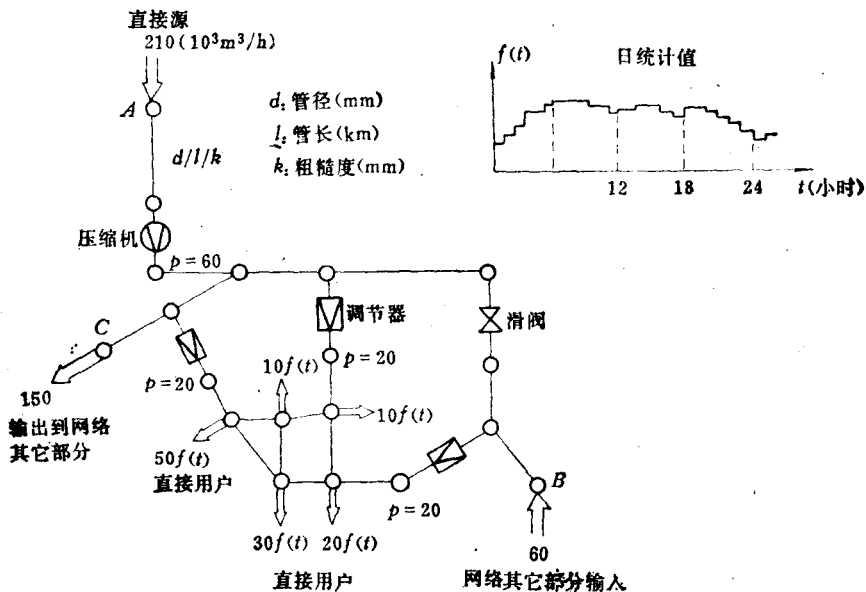


图1-2 天然气传输局部网络

在现代化的生产和社会活动中，还可以举出许多这样的例子，例如国民经济的计划管理、人口控制、运输网络、供水供电网络、数据管理信息系统、军事指挥系统、银行、海关、保险部门的信息系统、城市公共交通系统等等。在自动控制领域中，随着被控对象的复杂化，即使是单一的对象，如航天飞机、机器人，因其维数高、关连复杂，通常也可看作是大系统。由此我们看到，大系统是工程技术、社会经济、生物生态等各个领域内对于大规模复杂系统的总称。

毫无疑问，大系统都是多输入多输出的系统，但它与经典意义上的多变量系统有着本

质的差别。结合上面的例子，我们可以把大系统的特点归纳如下：

### 1. 系统维数高

大系统通常都有很高的维数。这种高维性，往往是由于其分布地域广大所引起的，例如区域性大电网，可能包含几百个发电站、变电所，每个发电站有许多发电机组，每个变电所又包括若干变压器及有关机电设备，它们由纵横千里的输电线路相联系，向成千上万分布在广阔地区的用户供电。这样的系统必然具有极高的维数。但是，分布地域广并不是引起高维性的唯一原因。随着系统复杂性的增加，其维数也会增加。例如在生物系统中，人类的脑组织就是由100亿个神经细胞组成的特高维系统。由于大系统的维数高，对系统作整体分析往往是不可能(需要过多的内存)或不经济的(需要过多的计算时间)。

### 2. 关连复杂

组成大系统的各个子系统或局部单元之间存在着复杂的关连。这种关连的复杂性不仅表现在内容上，例如它可以是物质、能量或信息的关连，而且表现在结构上，即关连的形式可以是多种多样的，甚至是有约束的。例如在一个信息传输系统中，考虑到传输成本及传输时间，某两个子站之间的信息传播有可能因不经济或不可靠而难以实现，这样，它们就不能相互利用对方的信息。这种关连结构的约束，虽然也可以存在于一般系统中，但在大系统中表现尤为突出，这往往使经典的处理方法遇到困难。

### 3. 不确定性

在大系统中，由于涉及到众多的单元和环节，很难对系统本身及其周围环境作出精确的描述。这种不确定性，在涉及到物理对象时，表现为对象参数随时间不确定地变化以及干扰的不可知，在涉及到信息时，表现为信息的不可靠性及信息传输中干扰引起的不确定性。由于不确定性的普遍存在及多样性，大系统的控制与管理要比一般对象的控制和管理复杂得多。

### 4. 目标的多样性

在经典控制中，往往只涉及到单一的目标。例如时间最优控制是要使对象到达期望状态的时间为最短；二次型指标最优控制是要使给出的二次型指标为最小等等。虽然在实际控制中有时也要在不同的控制指标之间求得折衷，但往往没有明确地提到多目标的高度。而在大系统中，正如上述例子所指出的，系统的多目标性是十分鲜明的。因此，对于大系统的控制与管理，已不可能用经典的单目标设计实现。

针对工程技术、社会经济等不同领域内各种大系统的这些共同特点，无论是经典的控制理论还是经典的运筹学都已显得无能为力，必须根据这些特点发展新的概念和方法。大系统理论就是在这种实际背景下发展起来的系统科学，它研究的是大规模复杂系统的控制和管理过程及其分析和综合方法。

## 1.2 大系统理论和方法的特点

由于经典的控制理论和运筹学方法已无力解决复杂大系统的控制和管理问题，从七十年代初期起，随着实际大系统的不断出现以及计算机技术、通信技术的飞速发展，大系统理论和方法的研究也迅速发展起来，并成为控制理论、系统工程等领域中一个异常

活跃的分支。从七十年代中期起的各次 IFAC(国际自控联)世界大会上,关于大系统的论文都占有相当的比例,从1977年起,IFAC还与 IFORS(国际运筹学联合会)一起,每隔三年组织一次“大系统理论和应用”的专题讨论会,1980年起,出现了关于大系统的国际性专业学术刊物“Large Scale Systems: Theory and Application”,甚至有人还认为大系统理论将是第三代的控制理论。

大系统理论和方法汲取了控制理论、信息科学、系统科学、计算机科学等广泛领域内的丰富成果作为自己的基础,但它决不是这些成果的简单组合或推广。大系统理论和方法的最基本特点是:它必须包含有处理大系统高维性、关连复杂性、不确定性及多目标性的新概念和新思想。虽然在其处理问题的细节过程中也要用到各个领域内的传统方法,但我们在学习大系统理论和方法时,必须牢牢把握住上述基本特点。

为了理解大系统理论和方法的特点,我们首先介绍一些在大系统研究中常用到的重要概念。

### 1. 集结 (aggregation)

大系统的高维性质,使得许多分析和综合工作受到了计算机运算速度、内存容量以及经济性的限制,在技术上难以实行。一般说来,在系统分析和综合中所涉及的运算,无论是可控可观性、稳定性的判别,还是最优控制最优滤波等等,其计算量和所需存储量都与系统的维数有着密切的关系。当维数升高时,它们都以超线性的比率急剧增长。这样,对于一个具有很高维数的大系统来说,运算的可实现性是很成问题的。

为了克服上述困难,大系统的研究中普遍采用了集结概念,这是指把原始系统的信息集合集结为较小的信息集合,以降低系统的维数,但同时又保持了原系统的特征信息。集结的目的不仅是为了使计算方便可行,而且还可从较高的层次上了解大系统各部分之间的关连特征。集结概念大量用在大系统的模型简化、控制和结构分析中,它是对付大系统高维性的有效手段。

### 2. 分解-协调 (decomposition-coordination)

传统的控制理论,总是把对象当作一个整体,所有的计算都是以集中的方式一揽子进行的。但在处理高维大系统时,由于计算量随系统维数增高而急剧增长,这种集中型的计算几乎成为不可能。在传统控制理论中,我们可以通过解耦的方法,把整体系统划分为互不关连或只有单向关连的子系统,使计算得到简化。但由于大系统各部分之间存在着复杂关连,这种简单的解耦对实际大系统是不现实的,因此,在大系统理论中必须引入新的方法,用以解决系统高维性带来的集中计算的困难,“分解-协调”的概念就是解决这一困难的有效途径。

所谓分解,是指把复杂的高维整体问题分解为若干个相互独立的低维子问题;所谓协调,是指这些子问题的处理相互协调相互配合,以实现大系统的总体目标。分解的结果,使集中的计算可以分散到各个子系统中进行,由于子系统是低维的,计算量可以大大减少。当这些子系统之间没有关连时,这相当于解耦的情况,但在一般情况下,子系统之间存在着复杂关连,这种子系统独立的假设是不现实的,所以由子问题得到的解,并不是整体问题的解,其差异程度取决于关连的强度。在这种情况下,有必要对各子系统的独立解进行协调,完成这一任务的是在较高层次上的协调器。显然,协调顾及了子系统间的关连,使分解后得到的各部分独立解接近并最终成为整体解。“分解-协调”的方法

对应着多级（子系统级、协调级）多目标（各子系统的独立目标）的控制结构。

用分解-协调方法进行控制时，控制器要获得系统的全部信息，控制是全局的，单一中心的，因此仍保持着信息集中、控制集中的经典模式。其主要优点在于把集中的计算分散化，从而简化了运算，便于使用小型机和微型机并行处理，提高了系统的可靠性。

### 3. 分散化 (decentralization)

由于许多大系统分布在广阔的地域内，集中化的控制方案往往难以实行，即使用分解-协调方法减少了计算量，但由于信息传输成本的考虑，对实际系统的信息结构往往有所限制，集中控制所提出的信息集中的要求也难以达到。此外，由于信息传输的滞后、可靠性等，还会带来一系列信息的有效性问题。针对这种情况，在大系统的实践中出现了“分散化”的新概念。这里所说的分散，是指信息分散化和控制分散化。图 1-3 比较了集中控制和分散控制结构上的不同。

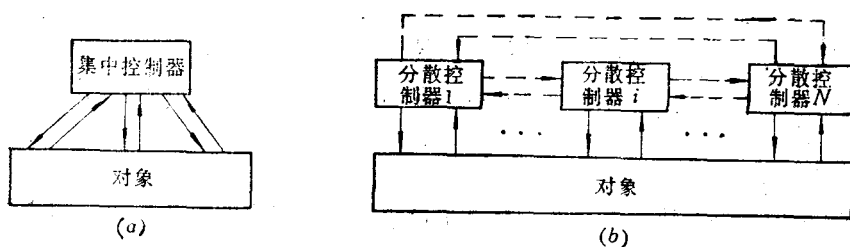


图1-3 集中控制与分散控制

(a) 集中控制；(b) 分散控制。

可以看出，在分散控制结构中，整个控制任务由若干独立的分散控制器共同完成，各控制器具有平等的地位，没有上下级从属关系，因此控制是多中心的，这是它与分解-协调方法的重要区别。在分散控制中，每个分散控制器只能获得大系统的部分信息（信息分散化），并利用这局部信息构成控制规律，对大系统的局部进行控制（控制分散化）。如果每个分散控制器只能获得它所对应子系统的信息，它们相互之间没有信息交换，则称为完全分散化；如果除此以外，还能从有限的信息交换（图1-3(b)中虚线所示）中获得系统其它部分的有限信息，则称为部分分散化。

大城市的交通管理、分区管理的大电网、计算机总线通信网络等都是分散控制的典型例子。从可靠性、经济性、技术实现等方面考虑，分散控制有很多优点：

- 由于控制分散化，个别控制器失灵，不致引起大系统崩溃，可靠性较高；
- 由于信息分散化，每个控制器需要接收处理的信息量少，便于快速决策与反应，提高控制的实时性；
- 通常大系统分布地域广大，分散控制可以就地局部控制，减少了通信费用，也提高了可靠性；
- 便于使用中、小型机和微机网络，分担系统的各种目标与功能。

当然，由于信息的不完全性，分散控制一般只能导致整体问题的次优解。

分散化概念带来的有约束的信息结构，是一种传统控制理论中没有涉及的非经典模式。在对策问题中，发展出了“队论”来处理信息缺乏时的多人对策问题。在控制问题

中，由于信息结构的约束也出现了一系列新问题。这使分散控制成为大系统理论中一个极其活跃的领域。

#### 4. 结构分析 (structural analysis)

大系统关连的复杂性，很重要的方面是其关连结构的复杂性。因此，在大系统理论中，有必要从更高的层次上，即从结构的角度来研究、分析和设计大系统。除了研究象分解-协调多级结构、分散化结构这类适合于大系统的控制结构外，对大系统的模型以及各种本质特性进行结构的分析，也是大系统理论和方法的重要内容。大系统的结构模型，有助于从宏观上理解大系统的组成和相互关连，这不仅可以使我们在技术大系统中认识子系统的组成层次和它们之间的联系，从而采取有效的控制策略，而且在大系统的管理中，可以把千头万绪的直觉信息进行逻辑划分，使之反映出管理的层次性和各种信息在其中的地位。在动态大系统的研究中，结构可控性及可观测性等，往往是控制大系统的先决条件。例如，一个动态大系统如果是结构不可控的，则不论怎样改变系统中的参数值，它都不可能是可控的。从这个意义上说，对于系统结构性质的研究，比起对具体系统的研究来，要更具有战略意义。在经典的控制理论中，参数模型往往是低维的，结构性质的研究尚未达到十分必要的地步。但在大系统中，这类结构分析是必不可少的，也是我们正确认识系统的重要途径。

#### 5. 启发式方法 (heuristics)

由于大系统中事物规律的复杂性，单是用传统方法中确定的数学形式，如状态方程或传递函数，往往不可能对系统作出全面正确的描述。即使我们有可能根据系统的内部机理建立数学模型或根据测量信息建立辨识模型，也还存在着难以包含在这类模型中的系统信息。对于管理、医疗诊断等信息大系统，甚至定性的经验和规则还起着主要作用。因此，对于复杂大系统的建模与控制，除了采用建立在定量数学模型基础上的成熟方法外，还可引入人工智能中启发式的方法，用逻辑-语义规则描述对象的模型或控制规律，对大系统进行研究。它是对付大系统不确定性的有效手段。在这一思想指导下，大系统理论已打破了单一数学模式的模型概念，而采用各种不同形式的模型，例如：定量数学描述加上启发式规则；适合于不同条件的多种模型组成的模型库；以数据和启发式规则为基础的专家系统等等。在控制和优化方面，大系统理论中也发展出了建立在预测技术和启发式规则基础上的各种优化和控制手段。人们曾经预言，人工智能将是系统理论和方法成熟的标志。随着高速度、大容量计算机的发展，这种建立在信息基础上的启发式方法，必将更多地应用到大系统的控制和管理中，这是大系统方法区别于传统方法的重要标志。

#### 6. 多目标决策与优化 (multiobjective-decision and-optimization)

大系统的多目标性，往往使建立在单目标基础上的传统控制方法无能为力。这种多目标性，不仅表现为大系统整体目标的多样性，而且还表现为大系统中各子系统目标的多样性。在用分解-协调方法处理大系统时，所谓协调，就是以整体目标协调各子问题中相互冲突的目标。但是即使在子问题中，仍可能存在不止一个的目标。因此，多目标决策和优化在大系统理论和方法的发展中占有重要的地位，它涉及到各类大系统的规划和控制。经典运筹学的各种决策优化方法，在应用到实际大系统时，必须立足于多目标加以发展。近年来，大系统研究中提出了递阶多目标分析的新概念，它把多目标决策与分解

-协调中的多目标问题统一在同一框架下进行研究，成为解决实际大系统优化问题的重要领域。这方面的许多理论成果，已在实际大系统的计划优化、资源分配等问题中得到了成功的应用。

以上介绍的这些概念，并不是大系统理论和方法的全部内容，但从中可使我们理解大系统理论和方法的兴趣所在。很明显，大系统理论和方法之所以区别于传统的控制理论和运筹学而成为一门新的学科，就是因为它在研究维数高、关连复杂、不确定、多目标的对象中，不断发展和开创出新的概念和方法。

在大系统理论和方法发展的初期，研究工作的重点在于处理大系统高维性及结构复杂性带来的困难，因此，模型简化、递阶控制、分散控制受到了很大的重视并获得了丰硕的研究成果。近年来，对大系统的研究已从高维性逐步转向其它复杂性，即关连、信息及目标的复杂性。人工智能方法逐渐进入大系统的研究中，多目标分析已成为研究的一大热门。此外，成熟的大系统理论和方法已越来越多地在社会经济、管理、交通、水源分配、能源、通信等系统中得到应用。

大系统的理论和方法在不断发展之中，其内容是极其丰富的。作为入门的向导，本书将从控制理论的角度出发，着重介绍动态大系统模型、控制、结构研究中的新概念和新方法，旨在使读者了解动态大系统的复杂性及一般处理方法。本书的内容侧重于大系统理论中比较成熟的成果，在这个意义上，也可以说是经典的大系统理论和方法。对于静态大系统的规划、优化、各种特定大系统的具体研究以及近年来把启发式方法引入大系统方法的新的探索，读者可参阅有关的文献或专著。

## 第二章 动态大系统的建模和结构分析

### 2.1 系统的模型

#### 2.1.1 模型的一般概念和分类

众所周知，系统的模型是用以描述其静态与动态特性的信息集合，是分析和综合系统的基本出发点。虽然对于模型有着各种各样的定义，但最重要的两点是：模型是对于所观察到的对象或现象的明确解释，并且它必须是有用的、便于处理的。

事物所表现出来的特性是丰富多样的。任何一种模型，都只能从特定的角度来描述对象，而不可能概括对象的全部特性。例如，当对象是某个空间区域时，如果我们期望描述该区域的几何特性，则通常的地图（保角地图）就是合适的模型。但如果研究的是区域中各有关点的连结特性，则可把交通图作为对象的模型。由此可见，模型的选择必定与建模目的相联系。要建立对象的模型，必须首先弄清我们研究的是对象哪一方面的本质属性。建模不仅是为了反映对象的构造属性，更重要的是为了反映对象的功能属性。

应该注意到，在模型的一般概念中，我们并未规定要以何种特定方式描述对象，因此，符号、映象、模拟、逻辑等形式，均可作为描述对象的模型。根据描述方法的不同，可以把模型按其本质分为以下四类：

##### 1. 映象模型

这类模型是真实系统的缩小或放大，它保持了实际系统的有关性质，只是在标尺上有所变化。因此，这类模型可以认为是原系统相当好的复制品，由它可以了解原系统的性能。例如供风洞试验用的飞机模型就是一种映象模型。

##### 2. 模拟模型

这类模型具有与原系统不同的物理形式，但能重现原系统的典型性能。例如，用在室温下通过小塑料水槽的水流可以研究在温度接近 $1000^{\circ}\text{C}$ 的大熔炉中的熔化玻璃的流动，电网络可以用来表示通过管道的水流或不同表面之间的热流。在更一般的情况下，模拟计算机可用来对大量物理现象建模，只要测量模拟网络中相应点的电压，就可得到系统中物理量的值。

##### 3. 解析模型

这是用数学关系或逻辑关系表达支配对象性质的规律。解析模型按其内容又可分为数学模型和结构模型两类，它是最常用的一类模型，本书中我们主要讨论这类模型。

##### 4. 概念模型

这是指定性描述对象的图形或符号模型。这类模型特别应用在人类活动的系统中，它有助于我们理解所涉及的活动，说明概念，弄清结构和逻辑关系，并且是系统设计的



必要条件。控制中常用的方框图，分析问题时的示意图，生产计划进度安排图等等，都是这类模型的例子。

在上面四类模型中，映象模型和模拟模型都是实体模型，它们通过实验手段重现原系统的特征信息，而解析模型和概念模型则是抽象模型，它们通过分析的手段提供必要的系统信息。由于实体模型涉及到物理装置或元器件，当所研究的对象较为复杂时，硬件代价甚大，使其应用受到很大限制。所以我们在系统分析与综合中常用的模型通常是抽象模型。借助于现代的数字计算机技术，很容易描述这类模型且无须付出附加的硬件代价。

不论是哪一类模型，除了要求它能正确反映系统的某些本质属性外，还要求它尽可能简单以便于使用。精确性和简易性，是对系统模型的两项基本要求，它们保证了模型的有效性和可用性，缺一不可。因此，在建立系统模型时，不应一味追求精确性而把模型建立得十分复杂，而应根据建模的目的，作出必要的简化假设，在精确性与简易性之间求得折衷，使模型既能满足系统分析综合的要求，又尽可能简化。从信息论的观点看，一个好的模型，应当能从描述系统的信息集合中，提取出与建模目的相适应的部分，并且加以整理，使之具有最简易的表达形式。

对系统模型的分类，并不意味着我们在建立系统模型时只能采用某一类模型。事实上，对于复杂的动态系统，往往需要采用多重模型描述方法。大系统具有有关连复杂、不确定性强的特点。与一般系统相比较，大系统的模型要复杂得多，往往需要把解析模型与概念模型结合起来，才能得到系统功能的完整描述。例如在一个分布式计算机控制与管理系统中，底层的物理现象往往用解析模型加以描述，中间级的监控与优化，除了解析模型外，有时还要用概念模型加以补充，而在最高层的管理中，除了某些优化问题可用解析模型描述外，在生产管理、安排调度的一系列过程中，概念模型往往起着重要的作用。此外，即使在同一层次上，为了正确地描述对象，也可以采用不同的描述方法。近年来在大系统建模中提出了数学-启发式模型的概念，就是用两种不同的方式描述对象：一是对对象的数学模型，二是反映物理或技术规则的启发式（或逻辑语义）模型。后者作为前者的补充，可用来描述在数学模型中未能包含的不确定性。这样的模型既可用于大系统的仿真，又可用于其控制。

### 2.1.2 大系统的数学模型和结构模型

本书中我们讨论的是建立在解析模型基础上的动态大系统，解析模型按其描述的关系而言，可分为数学模型和结构模型两类。数学模型是描述对象的定量关系的，而结构模型则是描述对象各部分之间的逻辑关系的。

数学模型是我们在系统分析和综合中最常用的一类模型。它是根据系统的物理性质、工艺机理或其它运动规律所建立起来的描述系统静态或动态特性的数学关系式。数学模型的基本要素是变量、参量、常量以及它们之间的函数关系。我们在传统的控制理论中所用到的传递函数、状态方程等，都是数学模型的例子。数学模型按其描述方式的不同可进一步划分类型，例如按所描述对象的变化特征可分为确定型、随机型和模糊型模型，按变量随时间的取值可分为连续和离散模型，按对象所处的状态可分为静态和动态模型，按模型参数随时间是否变化可分为定常和时变模型等等。此外，对于某些特殊系统或系