

# 大系统理论和方法

达庆利 何建敏 编

东南大学出版社

## 《系统科学丛书》出版说明

当今人类社会已经由“机器时代”跨入“系统时代”。系统科学是新时代占主导地位的科学，它是范围广、渗透性强的综合性学科。现实世界错综复杂、千变万化，但是，只要站在系统科学的高度就能透过其复杂的表象，抓住其主要特征，研究其相互关系，找出其共同规律，探求事物的本质。

为了适应科学发展的形势，加强出书的计划性和系统性，在有关专家的大力支持下，我社决定出版《系统科学丛书》。本丛书的选题围绕系统科学的基础理论、方法及其工程应用，主要收录有关学术专著、研究生教材或参考书，是侧重理论性和方法论的高层次系列书。相信本丛书的出版不仅会对从事系统科学、控制论、信息论、运筹学、系统工程等学科的专业人员、研究生、高年级大学生有所帮助，而且也便于其它领域的科技工作者拓宽思路、有所借鉴，从而促进边缘学科、交叉学科的发展。东南大学出版社愿为繁荣系统科学尽绵薄之力，努力扶植学术著作的出版，欢迎国内外专家学者踊跃投稿。

本丛书将陆续出版，各册相对独立，自成体系，编号以出版先后为序。

## 《系统科学丛书》编审委员会

主任委员：钱钟韩

副主任委员：冯纯伯 徐南荣

常务编委：陈天授

编委：（以姓氏笔划为序）

史 维 邢汉承 宋文忠 盛昭翰 黄可鸣

## 序

八十年代以来，随着计算机的广泛应用，大系统理论和方法的研究引起了国内外控制界和管理界学者普遍重视。在IFAC（国际自动控制联合会）大系统学术讨论会上，我国学者1980年（第二届会议）仅提出1篇论文，而1986年（第四届会议）提出的论文数已达27篇。为适应“自动控制理论及应用”、“系统工程”等学科研究生学习大系统理论和方法的要求，我校于1985年开设了“大系统理论和应用”课程。本书是在课程讲义基础上整理和充实而成。

本教材要求读者具有“线性系统”、“最优控制”和“系统辨识”的基础知识。学习过“泛函分析”的读者对其中部分章节内容会有更加深入的理解。限于篇幅，本书重点介绍确定性动态系统。通过本书的学习，读者可以了解和初步掌握当前大系统的主要研究方法及其在电力、化工、教育、经济和水污染控制等系统优化和控制方面的应用。本书取材广泛，使读者能对该研究领域的全貌有所了解。同时也有一定的深度，重要的定理尽可能给出证明，以便读者从中学习到处理问题的方法。此外，为便于学习，书中对正文推导所用到的基础知识也作了简要介绍，以备查阅。

本书第七章由何建敏编写，其余由达庆利承担。在编写过程中得到了我校徐南荣教授的指导、支持和帮助，在此谨致谢意。

由于大系统理论和方法仍在迅速发展，涉及面又十分广泛，加之受编者学术水平的限制，本书在材料的取舍，内容安排和论述的系统性等方面定会存在不少问题，恳请读者批评指正。

编者

1988年6月

# 目 录

|                       |    |
|-----------------------|----|
| <b>第一章 概论</b> .....   | 1  |
| §1-1 引言 .....         | 1  |
| §1-2 研究大系统的基本方法 ..... | 5  |
| §1-3 本书内容简介 .....     | 11 |
| 参考文献 .....            | 12 |

## 第一部分 大系统结构建模和结构性质分析

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| <b>第二章 结构建模</b> .....       | 15 |
| §2-1 结构模型及其图形和矩阵表示法 .....   | 16 |
| 2-1-1 结构模型 .....            | 17 |
| 2-1-2 结构图和邻接矩阵 .....        | 18 |
| 2-1-3 可达矩阵 .....            | 21 |
| 2-1-4 动态系统结构模型的表示法 .....    | 23 |
| §2-2 基于邻接矩阵对系统结构模型的分解 ..... | 27 |
| 2-2-1 可分离系统和可分级系统的判别 .....  | 28 |
| 2-2-2 结构模型的分解 .....         | 33 |
| §2-3 解释结构建模 .....           | 40 |
| 2-3-1 解释结构建模中的结构模型 .....    | 41 |
| 2-3-2 解释结构建模的一般步骤 .....     | 43 |
| 2-3-3 可达矩阵的建立 .....         | 45 |
| 2-3-4 可达矩阵的标准型 .....        | 50 |
| 2-3-5 结构模型的建立 .....         | 59 |
| 2-3-6 几点说明 .....            | 60 |
| 参考文献 .....                  | 62 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| <b>第三章 可控性和可观测性</b> .....             | 64  |
| §3-1 线性时不变系统的可控性和可观测性 .....           | 64  |
| §3-2 组合系统的可控性和可观测性 .....              | 69  |
| 3-2-1 广义合成法 .....                     | 69  |
| 3-2-2 系统可连通性的方法 .....                 | 73  |
| §3-3 结构可控性和结构可观测性 .....               | 78  |
| 3-3-1 结构系统和结构可控性 .....                | 79  |
| 3-3-2 结构矩阵的一般秩和形 .....                | 80  |
| 3-3-3 结构可控性条件 .....                   | 84  |
| 3-3-4 可连通性方法在判定结构可控性和结构可观测性中的应用 ..... | 89  |
| 参考文献 .....                            | 91  |
| <b>第四章 稳定性分析</b> .....                | 93  |
| §4-1 李亚普诺夫方法概述 .....                  | 93  |
| 4-1-1 时不变系统方法 .....                   | 93  |
| 4-1-2 时变系统方法 .....                    | 97  |
| 4-1-3 Cordunean定理 .....               | 99  |
| §4-2 互联系统稳定性分析的李亚普诺夫方法 .....          | 100 |
| 4-2-1 标量李亚普诺夫函数法 .....                | 101 |
| 4-2-2 向量李亚普诺夫函数法 .....                | 106 |
| §4-3 稳定域和连接稳定性 .....                  | 112 |
| 4-3-1 稳定域 .....                       | 112 |
| 4-3-2 连接稳定性 .....                     | 120 |
| §4-4 输入-输出稳定性方法 .....                 | 123 |
| 4-4-1 基础知识 .....                      | 124 |
| 4-4-2 输入-输出稳定性判别准则 .....              | 129 |
| 4-4-3 输入-输出稳定性和李亚普诺夫稳定性方法的比较 .....    | 131 |
| 附录 关于M矩阵 .....                        | 132 |
| 参考文献 .....                            | 141 |

## 第二部分 大系统的分解法估计和控制

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| <b>第五章 递阶控制</b> .....           | 144 |
| §5-1 引言 .....                   | 144 |
| §5-2 递阶结构的协调方法 .....            | 148 |
| 5-2-1 拉格朗日对偶性 .....             | 148 |
| 5-2-2 求解静态优化问题的分解-协调方法 .....    | 149 |
| 5-2-3 目标协调法 .....               | 152 |
| 5-2-4 模型协调法 .....               | 15  |
| §5-3 连续时间系统线性二次型问题的开环递阶控制 ..... | 156 |
| 5-3-1 目标协调法 .....               | 156 |
| 5-3-2 关联预估法 .....               | 163 |
| §5-4 离散时间系统线性二次型问题的开环递阶控制 ..... | 170 |
| 5-4-1 三级目标协调法 .....             | 170 |
| 5-4-2 Tamura的时延算法 .....         | 176 |
| 5-4-3 关联预估法 .....               | 184 |
| §5-5 非线性动态系统的开环递阶控制 .....       | 187 |
| 5-5-1 非线性系统的目标协调法 .....         | 188 |
| 5-5-2 Hassan和Singh的新预估法 .....   | 193 |
| 5-5-3 共态预估法 .....               | 214 |
| §5-6 时延系统的开环递阶控制 .....          | 227 |
| §5-7 线性系统的闭环递阶控制 .....          | 233 |
| 5-7-1 通过关联预估来形成闭环控制 .....       | 233 |
| 5-7-2 通过结构摄动形成闭环控制 .....        | 240 |
| 5-7-3 递阶控制的强壮性 .....            | 255 |
| §5-8 非线性动态投入产出模型的递阶优化 .....     | 259 |
| 5-8-1 动态投入产出的投资模型 .....         | 259 |
| 5-8-2 最优经济规划问题的提法 .....         | 262 |
| 5-8-3 非线性动态投入产出模型的递阶优化 .....    | 265 |

|  |            |
|--|------------|
| 5-8-4 应用.....                                | 286        |
| §5-9 讨论.....                                 | 292        |
| 参考文献.....                                    | 293        |
| <b>第六章 分散控制</b> .....                        | <b>295</b> |
| §6-1 引言.....                                 | 295        |
| §6-2 分散稳定化 .....                             | 297        |
| 6-2-1 预备知识.....                              | 297        |
| 6-2-2 分散稳定化问题的描述.....                        | 299        |
| 6-2-3 系统可分散稳定化的充分必要条件.....                   | 302        |
| 6-2-4 固定模态的计算方法和特征.....                      | 310        |
| 6-2-5 利用输出反馈使系统分散稳定化的方法.....                 | 315        |
| §6-3 分散控制器的优化设计 .....                        | 319        |
| 6-3-1 通过参数优化计算最优分散控制.....                    | 319        |
| 6-3-2 利用递阶结构计算分散控制.....                      | 324        |
| 6-3-3 使用关联模型计算分散控制.....                      | 328        |
| 6-3-4 使用模型跟随器进行分散控制.....                     | 333        |
| 6-3-5 具有交迭信息集合的分散控制.....                     | 337        |
| §6-4 分散控制的次 优性 .....                         | 344        |
| §6-5 强壮性分散 控制 .....                          | 346        |
| 6-5-1 对于系统参数扰动的强壮性分散控制——强壮性分散<br>伺服机构问题..... | 347        |
| 6-5-2 对于系统结构扰动的强壮性分散控制器的优化设计.....            | 360        |
| §6-6 讨论.....                                 | 375        |
| 参考文献.....                                    | 376        |
| <b>第七章 分解法参数和状态估计</b> .....                  | <b>379</b> |
| §7-1 平行分解法 .....                             | 379        |
| 7-1-1 算法及其收敛性.....                           | 379        |
| 7-1-2 递推算法.....                              | 382        |
| 7-1-3 计算量分析.....                             | 385        |
| 7-1-4 仿真及结果分析.....                           | 386        |



|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| §7-2 多重投影法 .....                | 389 |
| 7-2-1 一类最小方差估计及其性质 .....        | 389 |
| 7-2-2 多重投影法的基本定理 .....          | 395 |
| 7-2-3 两级多重投影算法 .....            | 409 |
| 7-2-4 递推算法 .....                | 412 |
| 7-2-5 仿真及结果分析 .....             | 414 |
| §7-3 递阶方法 .....                 | 424 |
| 7-3-1 极大后验估计及其滤波形式 .....        | 424 |
| 7-3-2 Arafteh和Sage的次优递阶方法 ..... | 433 |
| 7-3-3 Chen和Perlis的改进次优递阶法 ..... | 436 |
| 7-3-4 Hassan和Singh的共态预估法 .....  | 440 |
| 7-3-5 三种方法的结构框图和仿真实例 .....      | 444 |
| 参考文献 .....                      | 448 |
| <b>第八章 河流污染控制</b> .....         | 450 |
| §8-1 河流污染的最优控制问题 .....          | 450 |
| 8-1-1 水质模型 .....                | 450 |
| 8-1-2 河流污染的最优控制问题 .....         | 456 |
| §8-2 河流污染的递阶控制 .....            | 459 |
| 8-2-1 使用关联预估法计算开环递阶控制 .....     | 459 |
| 8-2-2 闭环递阶控制 .....              | 459 |
| §8-3 河流污染的分散控制 .....            | 467 |
| 参考文献 .....                      | 470 |

## 第三部分 大系统模型简化和次优控制

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| <b>第九章 模型简化</b> ..... | 472 |
| §9-1 集结法 .....        | 472 |
| 9-1-1 集结 .....        | 474 |
| 9-1-2 模态集结 .....      | 483 |
| 9-1-3 最优集结 .....      | 493 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 9-1-4 链集结               | 496 |
| §9-2 摄动法                | 510 |
| 9-2-1 正规摄动法             | 510 |
| 9-2-2 奇异摄动法             | 513 |
| §9-3 频域模型简化方法简介         | 524 |
| 9-3-1 时间矩匹配法            | 527 |
| 9-3-2 Pade近似法           | 530 |
| 9-3-3 连分式法              | 533 |
| 9-3-4 Routh近似法          | 538 |
| §9-4 讨论                 | 543 |
| 参考文献                    | 545 |
| <b>第十章 次优控制</b>         | 547 |
| §10-1 线性系统的次优控制         | 547 |
| 10-1-1 集结法              | 547 |
| 10-1-2 摄动法              | 553 |
| §10-2 非线性系统的次优控制        | 561 |
| 10-2-1 奇异摄动法            | 561 |
| 10-2-2 使用灵敏度方法计算次优控制    | 565 |
| 10-2-3 使用摄动和灵敏度方法计算次优控制 | 571 |
| §10-3 时延系统的次优控制         | 573 |
| 10-3-1 耦合时延系统的次优控制      | 574 |
| 10-3-2 串联时延系统的次优控制      | 582 |
| 10-3-3 非串联时延系统的次优控制     | 586 |
| §10-4 次优性的估计            | 591 |
| 参考文献                    | 596 |

# 第一章 概 论

随着科学技术的发展，规模庞大、结构复杂的系统日益增加。计算机技术的迅速发展，使得控制和管理这类系统成为可能。为了研究这类系统的正常运行条件和性能改进方法，在实际应用的推动下，大系统理论和方法应运而生。自本世纪70年代以来它们发展得特别迅速。有人认为，目前大系统理论已经发展成为新一代控制理论——第三代控制理论。

## § 1-1 引 言

大系统理论是以大规模系统为其研究对象，那么什么是大规模系统呢？

随着计算机技术的发展，人们把分散在不同地点的计算机连接起来，构成计算机网络。网络中的每台计算机都有自己的特定任务；而在其完成自己任务的时候，可以分享同一网络中其它计算机所存储的信息。这样，人们就可以用计算机网络去控制和管理更大的系统。所有此类能够在较大范围内采集数据，处理数据，分析情况，从而进行指挥、管理和控制的系统，人们称为大规模系统，或者大系统<sup>[1]</sup>。从这个非常直观的定义中可以看出，“大规模”通常是指系统的维数高。至于系统规模究竟大到什么程度才算是大系统的问题，目前尚无公认的定义。下面给出两个有代表性的定义方法<sup>[2]</sup>：

1. 为了便于计算或者实际应用，若能将系统分解(或分块)成多个互联的子系统(“小规模”系统)，该系统就认为是“大规模”的(Ho和Mitter, 1976)。

2. 当系统的维数大到用常规的建模、分析、控制、设计和计算的方法不能以合理的计算量来求解时,或者说如果系统需要的控制器多于一个时,这个系统就认为是“大规模”的(Mahmoud, 1977)。

在上述两个定义中,大系统的概念才有了推广。

大系统的实际例子如图1-1所示。这些系统大多是大范围的,即系统在地理位置上是分布的。由图可知,根据应用领域划分,“大系统”包括工程与非工程两大类,它涉及到工程技术、社会经济和生物生态三大领域。

从控制论的观点来研究上述大系统的特点,可以概括为三点:信息的采集和处理,系统的多级结构模型以及控制、反馈等过程模型的复杂性<sup>[1]</sup>。

首先,一个大系统通常要具有连续采集、存储和处理大批量多来源的各类数据的能力。例如,一个区域性经济管理系统应该接受该区域所辖的各个工厂、矿山、仓库和物资运输等方面的实时数据,必要时还要求能够调用主要企业的全部生产过程的情况和数据。信息来源是各式各样的:有的是来自直接安装在生产线上的传感器和测量装置;有的是经过汇总和压缩了报表;有的则可能是描述性的文字情报等等。此外,由于不是所有的信息对于形成管理和控制方案都同等重要,因而要求该系统具有数据分类和信息抽取的功能。总之,具有数据的采集、辨识、分类、存储、传输和抽取等功能是大系统的一个显著特点。这种功能是由通讯网络和计算机网络来实现的。

大系统的第二个特点是它的多级结构模型。无论是上述的经济管理系统,还是交通运输网的调度指挥等系统,由于所属的基层单位太多,这些基层单位的工作任务和组织结构千差万别,所提供的情报数据也不尽相同。所以,完全由一个控制中心实行集中控制往往是不可能的。这种非集中的控制结构的基本特点是:在紧邻基层单位之上的一级是它们的直接控制或管理中心,这些

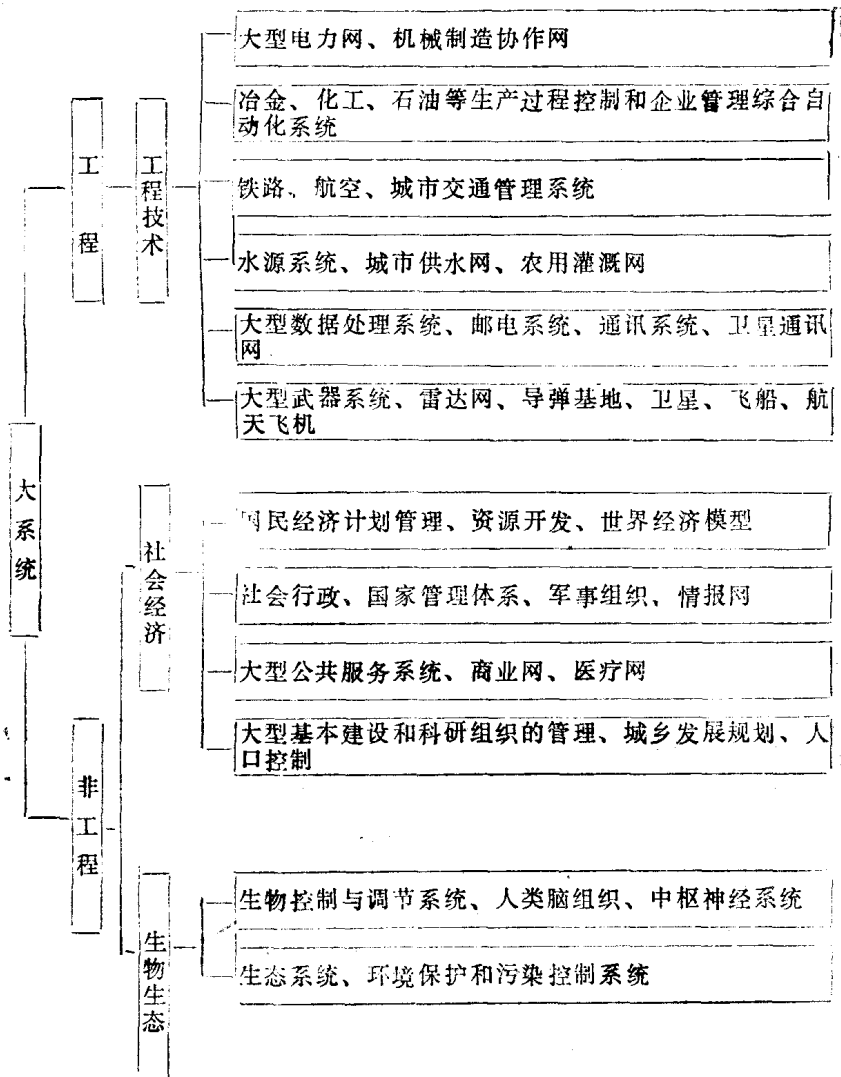


图1-1 典型的大规模系统

中心只管理或控制直接隶属于自己的一批基层单位的过程并采集相应的数据；再上一级可能是协调级，它们负责协调各自所属的

一些直接控制中心；最上一级负责制定总任务和总目标。任何上面一级都有可能从所属基层或所属各控制中心抽取信息并向它们发出控制信号。这种多级递阶结构示于图1-2中。

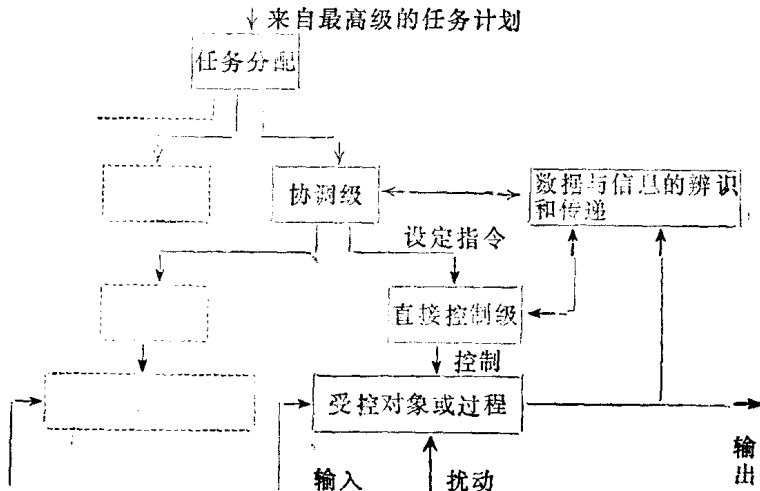


图1-2 大系统的多级结构

如上所述的控制作用不是发自单一的控制中心的现象叫做控制作用的分散性。微机的出现和普及，将使这种控制方式逐步成为大系统的主要工作方式。采用这样的控制方式，每一个控制器不能同时得到整个系统的信息。只能根据局部系统的信息，或者局部系统信息加上上一级的协调信息来形成自己的控制作用。根据控制器是否接受上一级协调信息，又可以将控制方式分成递阶控制(接受协调信息)和分散控制。大系统的递阶和分散控制中可能出现局部和总体的矛盾，这样给系统设计带来了新的问题。

大系统的第三个特点，也是最重要的一个特点，是控制、反馈等过程的复杂性。构成大系统的基本单元中的过程是千差万别的，往往既有自然现象又有社会现象。因此，要定量地描述这些现象常常不得不采用各种数学工具：常微分方程、偏微分方程、代数方程、逻辑代数方程、随机过程和图形表示法等。在大多数

情况下，研究大系统内部的精细结构是十分困难的，这就使得过程模型化的工作成为研究大系统的关键。而过程的复杂性还要求我们对“最优”的概念进行修正，常常采用较满意的“次优”策略来控制。

## § 1-2 研究大系统的基本方法

大系统的上述特点使得在研究它们的控制和管理时会遇到以下困难：

1. 由于大系统是由相互关联的基本单元所组成，具有特定的结构，并且涉及多种性质的过程，因而难于用传统的建模方法来建立其数学模型。

2. 在同一性质过程中会出现动态特性有显著差别的状态，因此，不能再使用统一的时间尺度来度量系统的特性。

3. 由于系统模型的高维数和复杂性，用传统的方法进行计算不但计算时间长而且要求占用过多的存储空间。因此，如果用传统的方法来实现大系统的控制和管理，将会对计算机的性能提出过高的要求，而这些要求甚至在计算机技术迅速发展的今天也无法满足。

4. 在研究地理上分布式过程的控制时，为了降低成本和提高系统运行的可靠性，常常要施加分散化的约束条件，即仅能根据本地的信息来确定局部控制。

5. 在定义管理和控制目标以及评价系统性能时，常常不再能够使用单一准则而必须使用多个准则，这些准则有时甚至是互相冲突的。

为了克服上述困难，大系统理论应运而生。当今，大系统理论已经成为系统工程学的一个重要理论基础，而大系统理论和实践已经成为系统工程中对事物发展进行定量描述、仿真、预测、控制和管理的有力工具。

随着大系统理论的发展，提出了多种克服上述困难的方法，其中主要有：结构建模和分析，分解-协调，简化和次优，以及多目标方法等。下面作简要介绍：

### 1. 结构建模和分析

一般认为大系统是由具有某些约束的多个互联子系统所组成，它具有复杂的结构。鉴于这种情况，大系统模型的建立通常需要分两步来完成：先确定它的结构，然后再进行辨识和参数估计工作。一个好的结构模型不但能够正确地反映所研究系统的因果关系，而且可以减少其后的辨识和参数估计的工作量。因此，结构建模是大系统研究领域中的极其重要问题。

对于仅涉及到一些物理对象和装置的工程技术系统，各基本单元之间的结构关系是直观的、明显的；而对于涉及到行为科学和社会科学中现象的大系统，这些结构关系是隐含的、不明显的，它常常取决于建模的目的以及建模者对这些现象的认识和理解，此时建立结构模型的工作尤为复杂。

为了有效地处理后一类情况的结构建模问题，已提出了大量的计算机辅助结构建模方法，其中值得提出的是“解释结构建模”方法。该方法不但适于处理大规模问题，而且是其它一些重要的结构建模方法的先行步骤<sup>[4]</sup>。这种方法建立在结构关系具有传递性假定的基础上，只要求建模者掌握系统中两两单元是否可达的主观知识。对于能够利用已输入的信息由传递性直接推导出的关系，则由计算机推理得到，而不要求建模者回答。这样不但最大限度地减少了要求建模者进行判断的次数，而且还可以避免在这些人为的判断中出现相互矛盾的情况，因而大大减少了建模者的工作量。<sup>[5]</sup>通过上述步骤便得到了可达矩阵，在此基础上进行划分，就可得到多级递阶形式的结构模型。

### 2. 分解-协调

分解-协调的思想是研究大系统的重要思想，它几乎贯穿于大系统理论的所有重要方面。



### (1)分解

分解是分解-协调方法的第一步,它可以分成三种主要方式:

#### a.水平(空间)分解

从整体问题出发,利用水平分解定义一组彼此独立的低阶子问题。每个子系统相应于一个子问题,它由一个局部控制器控制。

由此可见,水平分解是基于子系统的分解,为此首先要定义子系统。子系统的定义可以通过结构模型的分解找出强连接部分,可以根据控制作用的影响范围,或者按照系统的自然形式来实现。定义了子系统后,我们先暂时完全“切断”各个子系统之间的状态关联,或者暂时将关联变量设置为某个定值或函数,便可将原有高阶大系统分解为若干个易于处理的孤立子系统。其中按地理位置进行分解的方法又称之为分散。

#### b.垂直(时间)分解

垂直分解通过将控制作用分成不同层次上的控制来实现复杂的控制规律。

例如,一个复杂的工业控制系统可以采用如图1-3的方案来控制。图中将控制作用垂直地划分为如下四个层次:

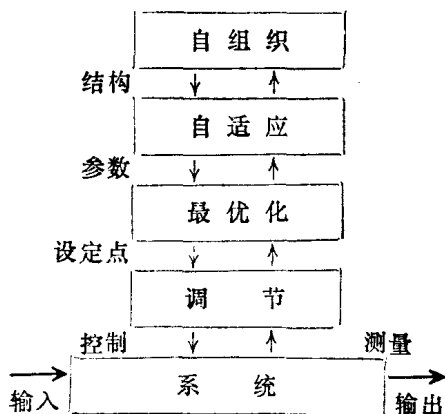


图1-3 工业控制系统的垂直分解