大系统的最优化及控制

〔英〕M.G.辛 〔法〕A.铁脱里 编著

Systems

Decomposition, Optimisation and Control

大系统的最优化及控制

〔英〕M.G. 辛〔法〕A.铁脱里 编著
周 斌 张国衡 王明良 译
王浣尘 校

机 械 工 业 出 版 社

M. G. Singh A. Titli

Systems: Decmposltion,

Optimisation and Control

Peramon Press

1978

* * *

大系统的最优化及控制

〔英〕M. G. 辛 〔法〕A. 铁脱里 编著

周 斌 张国衡 王明良 译

王浣尘 校

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行・新华书店经售

*

开本 $787\times1092\ ^{1}/_{16}$・印张 $26^{1}/_{2}$・字数 652 千字

1983 年 7 月北京第一版・1983 年 7 月北京第一次印刷

印数 0,001—8, 200・定价 3.30 元

*

统一书号：15033・5145

前　　言

本书是法国国立应用科学学院A.铁脱里教授和英国保罗赛别脱大学M.G.辛教授根据他们多年教学经验，在讲义的基础上经过修改和补充为大学高年级学生和研究生所编写的教材。全书内容比较丰富，以简明的形式和大量的实例讲解了大系统理论中的分解、最优化和控制技术的基本内容。

大系统理论是七十年代才受到广泛注意和重视的一门学科。它继承和发展了自动控制理论，控制论和运筹学等学科。它广泛应用在大型钢铁厂、化工厂多级计算机管理与控制系统，区域性或全国性电力网，铁路、航空、城市交通管理与控制系统，大型数据处理中心，情报、资料、档案自动检索管理系统，通信系统，卫星通讯网，导弹、卫星、宇航飞船控制系统，军事指挥系统，空防体系，国民经济计划管理系统，资源分配与开发规划，大型公共服务系统，商业中心，医疗中心，城乡发展规划管理系统，水源供应系统，农田水利灌溉网，输油、输气管线系统，机械制造加工协作网，工程建设组织管理系统，生态系统，环境保护与污染控制，环境与气象监测网，生态控制等方面。许多人认为大系统理论是第三代控制理论，是控制理论发展的新分支。A.铁脱里和M.G.辛教授是1980年国际自动化控制联合会（IFAC）大系统专题讨论会的两位副主席，他们对大系统有丰富的科研和实践经验，因此本书用大量实例来说明大系统在许多领域中的应用和今后趋势，本书例举很多应用实例。

本书可作为我国自动控制、工业（电气或机械）自动化、经济管理、生物工程、系统工程等专业的教材或教学参考书，也是从事各种控制系统设计和高级经济管理人员的工作手册。

本书由周斌（一章～四章，七章～九章，十二章），张国衡（十章～十一章），王明良（五章～六章）同志翻译，在本书翻译过程中曾得到陈禹六同志的指导与帮助，在此表示深切感谢。本书由王浣尘副教授校订，由李敬同志担任责任编辑。

限于我们的水平，错误与不妥之处在所难免，希望广大读者给予批评指正。

1982年

原　序

虽然有些大学开设了“大系统理论和应用”课程，但这门课与最优化技术和自动控制理论还分不大清楚。作者是把最优化技术、自动控制理论和大系统理论概括在这一本书中。于是，它对于要学一些基础运筹知识的自动控制专业学生和要学一些自动控制理论的运筹管理专业学生都能适用。本书就是为自动控制专业和运筹管理专业学生而编写的一本教材。

本书论述的最优化技术及自动控制理论适合一、二年级研究生的水平，也适合大学选修课学生自学。其中关于分解与协调方面的章节是大系统实际工作者和系统管理决策者所欢迎的。为适应多方面的需要，本书分四部分编写：第一部分，静态最优化，包括第一章至第四章；第二部分，动态最优化及控制，包括第五章至第八章；第三部分，辨识、估计及随机控制，包括第九章至第十一章；第四部分，强壮性控制，包括第十二章。每一部分都用相似的写法，互相并列，而它们都引伸到用系统分解法去处理大系统问题。

这样，在第一章中我们概述了数学规划问题，并在第二章中讨论了低阶系统的线性规划和用丹兹格·沃尔夫法分解高阶系统问题。在第三章中讨论了非线性规划问题，然后在第四章中介绍用分解协调技术来处理各种问题。我们的经验，这四章要讲授30学时。

在第二部分中，第五章开始介绍动态最优化问题，我们阐述了线性两点边界值问题。作为特例，讨论了线性调节器和伺服机构问题。在第六章中把分解-协调法应用到线性二次型问题中。在第七章中我们研究了非线性两点边界值问题和求解这些问题用的迭代技术。在第八章中我们讲到如何用分解-协调法来解决非线性系统的动态问题。这四章也要讲授30学时。

在第三部分中，第九章开始介绍概率论和随机过程。在第十章中介绍状态与参数估计技术和随机控制，然后在第十一章中应用分解-协调法去解决这些问题。这三章也要讲授30学时。

在第四部分中，我们讨论了强壮性控制问题的应用。这部分内容可以合并到第二或第三部分中一起讲授。

本书的第一、二两部分相对地是各自独立的，在学习任一部分时不会严重地影响到另一部分。但我们建议在学习第三部分时，应先学好第二部分。

M.G.辛　　A.铁脱里

目　　录

第一部分　系统的静态最优化

第一章　绪　　论

随着世界上消耗性（非再生）资源的日趋减少，人类更加重视获得最好的实际性能指标。这个问题特别在大系统中，例如：大型工厂企业，大电力网，交通网，通讯网，国民经济计划管理系统，大型商业中心，公共服务系统等领域的规划、设计、筹建和运行中，只要稍有改进就能获得巨大的社会经济效果。在任何场合，性能指标都与大量的决策有关。本书所讨论的问题，是如何确定一套“最好”的决策，以达到具体的目标。

为了明确什么是“最好”决策，我们需要：

（1）找出一个目标函数，使它能定量地描述决策的效果；

（2）建立一个模型，以便预测决策的效果；

（3）了解过去、现在和将来对系统产生影响的全部环境因素。

因此，最优化问题的实质在于利用上述第（2）点的模型和第（3）点中对环境的了解，找到一套决策，使第（1）点中的目标函数为最小。这里，建立模型是十分必要的，因为即便是最简单的系统也存在着多种可行的决策；而通过系统本身来试验具体决策的效果，往往费用很大，而在某些情况下，例如涉及社会的经济系统，这样做还是要冒风险的。

正如本书所指出，无论是建立模型还是最优化处理，都要进行大量的运算，而且随着问题阶次（或维数）的提高，运算量会迅速增加。对于许多重要的实际问题，其计算量竟超过一台数字计算机的容量。为了克服这个困难，本书不仅讨论最优化和控制的一般方法，而且研究处理多级复杂问题的分解方法。

因此，我们一边考察用于分解所得低阶子问题的方法，同时也考察那些处理较大问题的方法。本书的做法是先讨论低阶系统，然后再转向研究有关大系统的最优化和控制。本章先提供一个讨论一般问题的概要，以便在后面章节中，用以解决低阶和高阶系统。

下面，我们开始介绍有关控制问题的一些基本概念。

§1-1　系统的基本概念〔1, 2〕

1.1.1　控制系统

控制系统的术语

在可测量的量值中，应该把系统的输出与系统的控制区别开来。

所谓输出，就是指的那些量值，它们能同一个任务有所联系，而且它们的变化发展对我们来说又是具有重要意义的。作为设定值的任务，通常就表明了我们希望输出量所应达到的值或某个函数。

例如对于调节问题来说，输出应该达到并保持一个恒定的设定值。

在伺服机构或随动系统中，输出跟随着一个随时间变化的设定值。

所谓控制，就是指这样的一些变量，能改变输出的运行状态，从而执行所要求的任务。

控制随着时间的演变叫做控制策略或称为控制轨线，而所关心的时间间隔叫做控制时界。

时界可以是有界的，也可以是无界的；可以事先决定，也可以结合控制过程的情况来决定。如果时界不是事先固定的，则时界称为自由的（例如，按照与设定值相符合来确定时界）。

通常，控制量和输出量并非可以任意变化，而是需要满足某种约束条件。满足约束条件的控制和输出叫做容许控制量和输出量。

约束可能是等式的($\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})=\mathbf{0}$)，但一般是不等式的($\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})\leqslant\mathbf{0}$)。对于某些场合，这些约束可能是瞬时满足的，但是对另外一些场合来说，这些约束的积分则是必须满足的。

瞬时不等式约束通常对应着实际条件的限制。

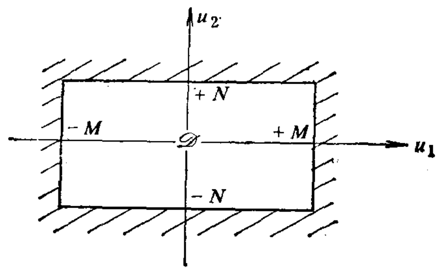

图 1-1

例如图 1-1 所示，$|u_1|\leqslant M$，$|u_2|\leqslant N$

如果 u_1，u_2 都是控制量，则这些约束就在控制空间里定义了一个闭合的区域，叫做容许控制约束区$\mathscr{D}$。

积分不等式约束($\int_0^T f(t)\mathrm{d}t<k$)往往对应着一些与控制轨线有关的变量限制。如火箭的燃料就是有限的。

须知，对输出量的约束可以用对设定值同样的方法来看待。

最优化概念

到现在为止，由控制过程所完成的任务仅仅是由设定值来描述的。不过一般地说来，大多数控制轨线都可以实现这个设定值，而同时又都能满足各项约束。因此，我们有必要在这些控制轨线中进行选择，于是也就提出了这个最优化的概念。

为了对各种可能的容许控制进行合理的选择，需要找出一个目标函数（或评价函数）。选择目标函数是一件既重要而又困难的事情，为此不仅要凭某个人的直觉，而且还要用各方面的经验，或者两者兼用之。

在静态系统中，目标函数有瞬时特性。另一方面，对动态问题，目标函数则表示为积分形式，而与控制轨线和系统的变化发展有关。

例如目标函数$J_1=\int_{t_0}^{t_f} r\mathrm{d}t$(积分目标函数)，式中 r 为基本支付。

另一种目标函数 $J_2=g(t_f)$是一个终点判据，它只包含末端瞬时的变量值。

这样，最优控制轨线是使支付为最少（根据不同情况可以是时间最短，或燃料最省等等），能实现规定的设置值，并满足约束的控制轨线。

目标函数一般是标量。不过，如果是向量，最优化技术仍可使用，但这将在专门的论著中介绍了。

在表 1-1 中列出了最常用评价函数的各种数学形式。

控制系统的分类

控制系统有下列五类

表1-1 静态过程及动态过程常用的评价函数

静 态 过 程	
$J_1=\sum\limits_i C_i x_i$	J_1是变量x_i的线性函数，C_i是常数
$J_2=\sum\limits_i C_i x_i^2$	为二次型目标函数
$J_3=\phi_1(x_1)+\cdots+\phi_n(x_n)$	可分离目标函数，即每一个函数$\phi_i(x_i)$是x_i的单变量函数，它不一定是线性的
$J_4=\phi(\boldsymbol{x})$	这是目标函数的一般形式，ϕ是变量$\boldsymbol{x}^T=(x_1, x_2, \cdots, x_n)$的非线性函数①
动 态 过 程	
$J_5=\int_0^T \mathrm{d}t=T$	最短时间问题（这里时界T是自由的，而是利用一个优化程序来确定的）
$J_6=\int_0^T (\boldsymbol{x}-\bar{\boldsymbol{x}})^T Q(\boldsymbol{x}-\bar{\boldsymbol{x}})\mathrm{d}t$	最小均方误差问题（这里时界是固定的，其中$\bar{\boldsymbol{x}}$为参考状态向量）
$J_7=\int_0^T \mathrm{d}t+\mu\int_0^T (\boldsymbol{x}-\bar{\boldsymbol{x}})^T Q(\boldsymbol{x}-\bar{\boldsymbol{x}})\mathrm{d}t$	这是J_5和J_6的综合式（T是自由的，μ是加权因子）
$J_8=\int_0^T L(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}, t)\mathrm{d}t$	$\boldsymbol{x}$为状态变量，$\boldsymbol{u}$为控制变量，L一般为非线性函数
$J_9=G[\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}, t]_{t_0}^{t_f}+\int_{t_0}^{t_f} L(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}, t)\mathrm{d}t$	这是用在动态最优化中的一般形式

注① 式中向量或矩阵的角注T为转置符号，下同。

（1）开环控制系统　这是一种预定性控制系统，它对施加控制后的结果没有任何调节作用，如图 1-2 所示。

（2）闭环控制系统　该系统包含有一个正向通道和一个反馈通道，使得控制变量成为被控制系统状态的函数，如图 1-3 所示。

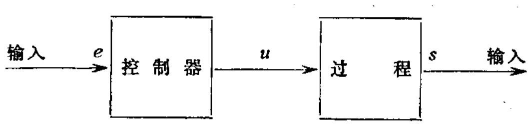

图 1-2

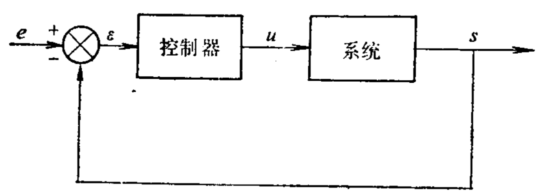

图 1-3

（3）自适应控制系统　该系统在环境条件有大范围急剧变化时，能改变系统本身的参数或控制作用的方式，使系统仍按某一性能指标继续运行在最优状态。

（4）自组织控制系统　该系统能在环境变化的情况下，选择自己最适应的结构。

（5）递阶或多级系统　这里的控制作用是分布在很多级上来控制的。

附注

（1）开环控制问题可以是静态的或是动态的，而对闭环控制来说，由于控制是状态的函数，所以闭环控制问题，一般就是一个动态最优化问题。

（2）带有随机因素的控制问题，称为随机问题，将在第九、十和第十一章中进行讨论。对于没有随机输入的控制问题叫做确定性控制问题，本书前八章集中讨论确定性问题。

下面我们讨论系统的数学模型问题。

1.1.2 数学模型和辨识

在最优化技术中，一般都包括一个数学步骤，所以对相应系统首先要进行数学描述。换句话说，就是一个实际过程必须用一组数学关系式来给以表述，而这一组数学关系式就构成了这一过程的数学模型。

对过程建立数学模型叫做辨识。辨识的精度可以由真实系统的输出与模型的输出间的差异来测量。

辨识是实现优化的第一个重要步骤，因为优化的结果与模型的正确性有极大的关系。这里，有必要对模型的复杂性(需要描述得越精确越真实越好)与必要的简化模型(使优化可行)进行折衷考虑。模型可以利用各种因素来简化，例如线性化，由约束条件所限定的定义域等。

通常，辨识可以分成两方面来进行，即结构确定和参数估计。

模型结构通常由我们对过程已有的物理知识来确定。

参数估计能使我们对参数给出精确的数值，让模型来描述一个真实过程，而不是描述过程属哪一类这种粗略的分辨。参数估计往往需要系统输出和输入的实验数据。

在自适应的模型化方法中，是把结构确定与参数估计结合起来同时进行的[3]，如图1-4所示。

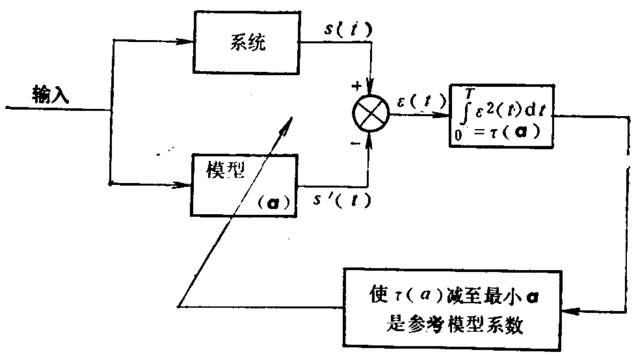

图 1-4

数学模型的组成可分为：

（1）代数方程（对静态过程）。

（2）积分-微分方程（对动态系统）。

（3）偏微分方程（对分布参数系统）。

表1-2 模型的基本分类表

序号	模型分类	备注
1	静态线性系统：$y=Ax$	输入$x\in R^n$，输出$y\in R^m$，A为$m\times n$矩阵
2	静态非线性系统：$y=g(x)$	g为非线性函数向量
3	自治线性动态系统： $\dot{x}=Ax(t)$	$x\in R^n$ A为$n\times n$常数矩阵
4	线性动态系统： $\dot{x}(t)=Ax(t)+Bu(t)$	控制$u\in R^m$ B为$n\times m$矩阵
5	时变线性系统： $\dot{x}(t)=A(t)x(t)+B(t)u(t)$	A，B都不是定常矩阵
6	线性闭环控制系统： $\dot{x}(t)=A(t)x(t)+B(t)u[x(t)]$	
7	线性化非线性系统： $\dot{x}(t)=A(t)x(t)+B(t)u(t)+g(x,\ t)$	$g(x,\ t)$为非线性函数向量
8	非线性动态系统的一般形式： $\dot{x}=g(x,\ u,\ t)$	
9	离散时间系统： $x_{n+1}=f_n(x_n,\ u_n,\ n)$	

（4）差分方程（对离散时间系统）。

在表 1-2 中概括了模型的基本类型，这些类型在本书中大都可以遇到。

下面我们介绍最优化方法。

1.1.3 最优化方法

近来，为解决最优化问题提出了一些方法，即既达到设定值和最优准则，又满足约束条件的控制轨线问题。

一旦问题的数学描述具备（包括数学模型，准则函数和约束条件）之后，可由经典理论得到实用解法。数学描述可分成如下三类。

（1）数学规划（线性及非线性规划）；

（2）动态规划；

表1-3 静态过程和动态过程采用的最优化方法

	问题的描述形式	方法
	一、静态过程	
1	无约束问题 $\max J=J(\boldsymbol{x})$（准则） 式中$\boldsymbol{x}$为向量	初级极值原理
2	等式约束问题 $\max J=J(\boldsymbol{x})$（准则） 约束条件为$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})=0$（等式约束）	拉格朗日乘子方法
3	不等式约束问题 $J=J(\boldsymbol{x})$ $\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})\leqslant 0$（不等式约束）	
4	线性问题 $J=\sum_i C_i x_i\ (i=1,\ 2,\ \cdots,\ n)$ 约束条件为 $\sum_i a_{ij}x_i=b_j\ (j=1,\ 2,\ \cdots,\ m)$ $x_i\geqslant 0\ (i=1,\ 2,\ \cdots,\ n)$	单纯形方法
5	一般非线性问题 $J=J(\boldsymbol{x})$ 约束条件为 $g_j(\boldsymbol{x})(\leqslant=\geqslant)b_j\ (j=1,\ 2,\ \cdots,\ m)$	非线性规划
	二、动态过程	
1	线性问题 $J=J(\boldsymbol{x},\ \boldsymbol{u},\ t)$ 约束条件为 $\boldsymbol{\phi}=\dot{\boldsymbol{x}}-\boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{x}-\boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{u}=0$	变分法 动态规划 梯度法
2	非线性问题 $J=J(\boldsymbol{x},\ \boldsymbol{u},\ t)$ 约束条件为 $\boldsymbol{\phi}=\dot{\boldsymbol{x}}-\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x},\ \boldsymbol{u},\ t)=0$（$J$，$\boldsymbol{g}$为非线性）	变分法 动态规划 梯度法 准线性化法
	三、复合静态或动态系统	按数学规划和变分法的分解-协调法，递阶控制与最优化

（3）变分法——极大值原理，经典变分法。

另一方面，当没有数学模型时，就不能用数学方法而只好用直接最优化方法（极值搜索法）。这将在其它专门论著中讨论。

下面把一些问题的描述与相应的解决方法对照起来，如表 1-3 所示。

在最优化方法的选择上，我们应考虑的因素是：

（1）问题的性质是静态的还是动态的；

（2）问题的性质是线性的还是非线性的；

（3）问题是单变量的还是多变量的；

（4）有关约束的情况。

为了解决最优化问题需要我们处理两类问题是：

1. 在数学分析方面

（1）解的存在性；

（2）解的唯一性；

（3）最优的必要条件；

（4）最优的充分条件；

（5）极值的性质。

就上述 5 点来说，在后续章节中准则和约束的某些性质将起着重要的作用。

2. 在计算方面

（1）现有的数值近似解法；

（2）用户所用的计算器或计算机的型号和容量；

（3）当用迭代方法时的收敛性；

（4）计算时间。

在最优化实践中，所有这些计算上的要点都是重要的。

为了总结一下上述讨论，我们用流程图来说明对最优化问题进行描述和求解中的不同阶段，见图1-5。

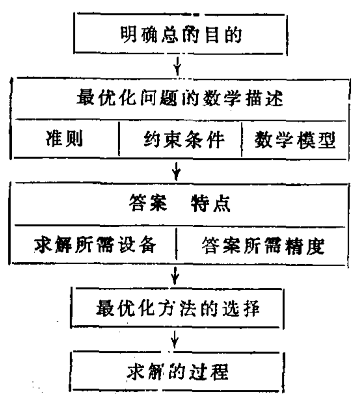

图 1-5

下面我们介绍控制系统的综合问题。

1.1.4 控制系统的综合

研究一个控制过程的最后步骤就是实现所求得的答案，也就是对所研究的过程，设计一个实际系统，针对所需的输出提供必要的控制。

如果，数学模型是精确的，即与实际对象完全一致，则一个开环控制器就够了。

但是由于种种原因（模型化的近似，扰动，解法的近似等等），精确解答往往是不现实的。所以通常使用闭环方法，以使实际过程不受上述缺陷的影响。

由于闭环控制往往可以用一个比较简单的（因而也是廉价的）控制器，来保证近乎最优的性能指标。

以上讨论了最优化和控制问题的一般方法，下面再研究近几年来在处理复杂系统问题中有关控制和系统工程的进展情况。

§1-2　系统工程学的进展

1.2.1　概述

复杂系统（亦即某种高阶系统，其各子系统互相牵连，其目标又可能互相冲突）问题，在分析、分解、集结及控制上出现了极大的困难。这种复杂系统不仅在工业领域中存在，而且在社会经济领域，交通运输和分配，能源系统等等中也都存在。

虽然有可能对低阶系统直接进行分析方面的工作（这里，分析指的是明确输入和输出、控制、模型结构、参数估计以及确定准则等等）和控制方面的工作（即拟定和实现控制算法），但这对高阶系统一般是做不到的。困难可能就在理论上（用于大系统的一些算法或者是收敛不好，或者甚至是发散的），或是出于经济上的某种考虑（对新式计算机的投资与预期的收益不相称）。

另一方面，处理复杂系统问题还要求：

（1）由于维数很高，需要新的分析方法。

（2）在控制前需要一个中间步骤，它包括：按集结方法减少问题的维数，然后应用一些标准的方法，象数学规划、动态规划等等；或者把系统适当地分解成若干个子系统，按分解-协调原则和采用多级控制结构。

利用分解-协调原则来拟定控制算法就能综合多级控制结构，可以有效地解决复杂问题。

这些不同方面之间的联系，如图 1-6 所示。所提出的方法都适用于上述的每一个步骤。

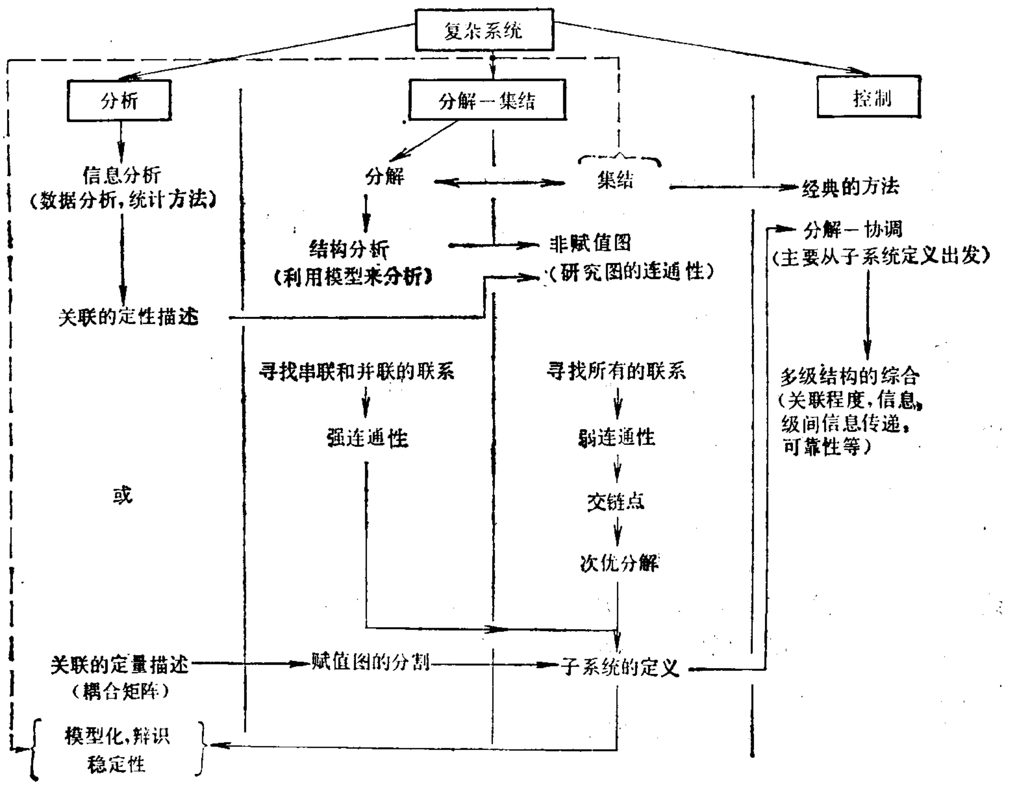

图　1-6

下面我们予以简要说明。

1.2.2 分析[4,5]

一般说来，高阶系统的所有变量并非都是彼此牵连的，即使有牵连，就变量之间的耦合程度来说，也存在着一个递阶关系。分析过程的目的在于从这个递阶的假定出发来研究复杂系统，而该系统的特点在于依据对原始数据的分析来确定系统的结构。

分析的目的是求得一个耦合矩阵，其元素(i,j)表征着变量x_i和x_j间的耦合程度（由统计决定），从而利用这些信息以便我们能对系统进行分割或分解。

耦合程度可以为0或1（这适用于非赋值图描述的定性研究），它也可能为0和1之间的某个数值（这适用于以赋值图描述的复杂系统的定量研究）。

对于连续系统，静态耦合是由相关系数来表示的，而动态耦合则是由相关函数来表示。这里可以采用统计数据分析的所有方法（赋范原则组分析等等）。

对于离散系统可以利用信息理论中的概率论[6]。

1.2.3 集结[7]

集结是多级方法的一种补充，指在一定的条件下把高阶系统降阶成等效的低阶系统。它可以用在次优控制，状态估计和参数估计等方面。

为了简明地了解集结这个概念，让我们考察两个动态系统S_1和S_2，这里系统S_1的维数为n，S_2的维数为l，且$n>l$。S_1可以是受控过程，S_2为控制器的模型，或者S_1和S_2两者都是复杂程度不同的模型。设$\boldsymbol{x}$是S_1的状态，$\boldsymbol{z}$是S_2的状态。在线性集结情况下，这些状态满足下述关系：

$$\boldsymbol{z}=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}\ （\boldsymbol{C}\text{为一个}l\times n\text{常数矩阵}）$$

因此，集结必然包含$\boldsymbol{C}$的选择，而这个选择就决定了控制结构的形式，而把这个控制结构用到实际的S_1系统上去就确定了整个系统的次优性和稳定性。

下面我们介绍系统的分解。

1.2.4 复杂系统的分解（或分割）[4,5,8]

复杂系统可用点线图（或简称线图）的形式来描述。线图的表示法有下述规定：

（1）图中的点表示变量，如事件或状态，有时也可以是一个子系统。

（2）图中的线表示两者间有关联。

这样一来，就能把复杂系统分割为互相联系的子系统。

交链点对应着耦合变量，而切断交链点之后可能得到子图。每个子图中仅有一些简单的连线，这样的子图称为子系统。

对于高阶点线图，交链点的数量（也就是分解指数）可能是很大的，因此选用某些准则（如最小关联作用准则）是必要的。

另一方面，利用点线图的强连通性质，可以划出一个实际存在的串-并联结构，而子系统的阶次已有代表子系统的各个强连通部分的秩㊀固定了下来。

最后，如能构造一个与复杂系统相对应的赋值图，那么，这时的分解便成为这个点线图的最优分割问题。

下面我们概要介绍递阶控制技术。

㊀ 即在方程中的rank。

1.2.5 递阶控制的一般原理

1.2.5.1 多级-多目标结构

总体控制系统可表示如图 1-7 所示。

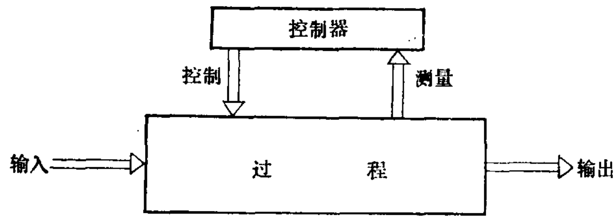

图 1-7

但对于复杂系统要采用这种方式进行控制是困难的。这样的控制器叫做单级-单目标控制器。若把整体系统看成是由一些独立的子系统组成的，则可以定义为单级-多目标控制结构，如图 1-8 所示。

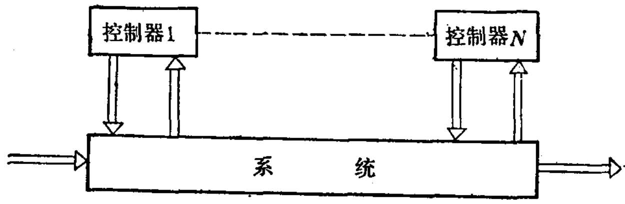

图 1-8

然而，因为这种独立性的假设显然是不现实的，所以由总体控制器所给出的答案是次优的，其次优性的程度往往取决于子系统之间的关联强度。

当子系统间的关联很强（这往往是大系统的情况），并且由一个准则函数把每个控制器联系起来时，若这些控制器的动作没有轻重缓急之分，则在各个控制器之间将会发生冲突。为了解决这些冲突，我们设想了一个第二级控制，其中考虑了相互间的联系和调节，而且若有必要就可调整任何一个控制器的目标。于是，我们就有了一个多级而且多目标的控制结构。

基本上，我们考虑了一个由许多控制器组成的控制系统，控制器是以金字塔形式按递阶方式配置的，使得第一级上的每个控制器只控制一个子系统，子系统之间彼此又是有联系的。这种多级-多目标控制结构如图 1-9 所示。

在这个结构中，控制器是在两级或更多级中配置的，而其中某些控制器与被控制过程只有一个间接的出入通道。这样的一些控制器是从较高一级的控制器接收信息，并且用以控制

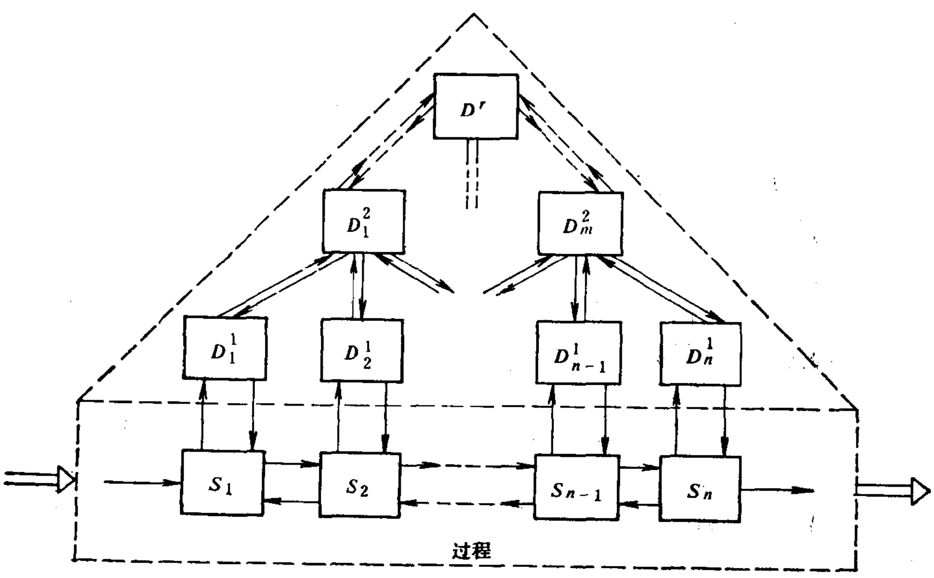

图 1-9

较低一级的控制器（或子系统）。

这个系统叫做多目标系统，因为各控制器有不同的目标，这些目标甚至部分地也有冲突。

但是，另有一些控制器起协调低一级控制器的作用，这就使我们能够消除这些冲突，以获得问题的解决。

这种结构的特点说明如下：

（1）低一级控制器的目标是彼此独立的，并且一般不必互相了解。

（2）这些控制器在功能上彼此是不同的，也就是说，尽管从硬件的实现来讲，所有的控制器都可以在一台计算机或配置在一个互联的计算机组上编制程序，但其软件实现是不相同的。

（3）在递阶系统中，需要规定目标的高一级设备必须这样工作，以使它所求得的解（或近似解），与采用总体方法所求得的解相同。因此，协调器（即较高一级的控制器）的一个重要任务是保证递阶系统能满足总体方法所要满足的必要条件。

在设计多级结构中，基本的两点任务是任务分配（工作划分）和协调。

1.2.5.2 工作划分

水平划分 为了减少计算上的困难，在确定了互联系统之后，就可以把总体问题表示成一系列容易处理的低阶子问题。每一个子问题可以由局部控制器（处在递阶系统的最低级）来解决，各控制器的工作由较高一级来协调。

垂直划分 这里，每一个控制任务是垂直地被划分成一些基本的控制任务。可以垂直划分成各级，如图1-10所示。这些级是：

（1）调节或直接控制；

（2）最优化（确定一组调节器的设定点）；

（3）自适应（模型与控制规律直接地自动适应）；

（4）自组织（按照改变着的环境，自动选择模型结构与控制）。

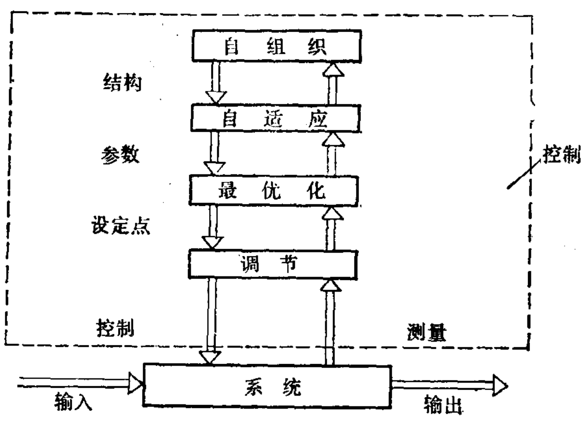

图 1-10

时间划分或功能划分 一个复杂过程可能处于变化繁多的环境中，而它对明辨这些环境并在各种可能出现的事情之间进行协调是很重要的。例如，在稳定的动态系统中，对瞬态有一个策略，而对静态则可有另外一个策略。

附注

上述不同的工作划分方法，可以单独使用，也可结合起来用于一般的多级-多目标系统。

1.2.5.3 协调

递阶控制的另一个原理就是把一个总体问题P，分解成一定数量的子问题P_i。在这里，这个总体问题P的目标是使复杂系统的总体准则取极值，而P_i是局部求解的，要使

$$[P_1, P_2, \cdots, P_n]\text{的解} \Longrightarrow \text{总体问题}P\text{的解} \quad (1.2.1)$$