

# 关于大系统理论的几个问题\*

涂序彦

(中国科学院自动化研究所)

## 摘 要

本文讨论关于大系统理论的几个问题,即:什么是大系统?大系统理论与控制理论的关系;大系统理论与系统工程的关系;大系统理论与控制论的关系;大系统理论的特殊问题。

作者认为,大系统理论是第三代控制理论的重要内容,是综合自动化的理论基础。另一方面,大系统理论也是系统工程发展的新阶段——动态系统工程。也可以说,大系统理论是控制论的新分支——大系统控制论。大系统理论不是关于系统大小的分类学,而是大规模复杂控制与信息系统分析和综合的方法学,是研究大系统的系统科学。

## 一、引 言

近几年来,大系统理论(Large Scale Systems theory)在国外、国内都受到相当的重视。但是什么是大系统?目前还没有明确的、普遍接受的定义。从不同的学科、不同的观点,对大系统理论有不同的看法。它与控制理论、系统工程、控制论等有什么关系?有哪些共同之处?有哪些不同之处?这些问题需要讨论,本文试图提出一些初步看法。

## 二、什么是大系统理论

要回答什么是大系统理论,先要回答什么是大系统。这里我们不去追求严格的数学定义,而是从实际例子出发进行归纳,看看通常文献中谈到的大系统有哪些特点<sup>[1,2,3]</sup>。

### 1. 规模庞大

通常大系统包含的小系统、部件、元件甚多,占有的空间大,花费的时间长,涉及的范围广。例如,区域性或全国性大电力系统。可能包括几百个发电站,而每个电站又有若干发电机组,由纵横数千里的输、配电线路联系起来,向成千上万分布在广阔地区的用户供电,这就是典型的大系统。又如,国民经济管理体系,地球海洋生态系统等等。所以大系统的数学模型通常是多变量、高维或高阶的。

当然,规模庞大并不一定意味着空间大、地域广,主要指包含的小系统多。例如,人类脑组织,尺寸体积不大,但它是由 $10^{11}$ 个小系统(脑细胞)组成的特大系统。

### 2. 结构复杂

大系统中各小系统、部件、元件之间的相互联系,信息结构十分复杂。例如,大型冶金、石油、化工企业的综合自动化系统,各工厂、车间、机组之间,不仅在生产工艺流程中有

\*本文曾在中国自动化学会1978年年会上宣读。本文修改稿于1979年3月18日收到。

物料流、能量流的相互联系，而且通过多级计算机与数据通信网络，有复杂的信息流的相互联系。不仅有“机器-机器”之间的相互联系，还有“人-机”，“人-人”之间的相互联系。不仅有工程技术的，还有社会经济的相互联系。

大系统具有多级、多层、多段等各种结构方案，具有分散控制、集中控制等各种方式。在分散控制中，又有完全分散、部份分散与完全不通信、部份通信等多种信息结构。例如，大城市的交通管理系统。

### 3. 功能综合

大系统常具有综合性的、多方面的功能与目标。

现代工业、交通管理控制大系统，常具有生产过程控制、企业经营管理、资源综合利用、环境污染控制……等多方面的综合性功能。比如，采用“多级”结构方案的大系统中，各级分别具有过程控制、调度管理、计划决策的功能。采用“多层”结构方案的大系统中，各层分别具有直接控制、最优控制、自适应、自组织的功能。

功能的综合性取决于目标的综合性。大系统的目标也常是多指标、综合性的。比如，大系统最优化的目标函数包括产量最高、质量最好、原料消耗最少、能量消耗最少、成本最低、可靠性最高、污染最小……等多种指标，反映技术、经济、环境等多方面要求。多指标决策是大系统理论重要问题之一。

### 4. 因素众多

由于大系统的规模庞大、结构复杂、功能综合，所以大系统涉及的内部因素与受到的外部影响众多，信息传递处理量大。例如，经济计划管理系统、军事指挥系统等。在大系统中需要控制、管理、观测、监控的变量多，系统与外部环境的相互影响多。所以，大系统必然是多变量系统，通常是多输入、多输出、多干扰的。比如，一个水源控制系统的简化数学模型，有 26 个状态变量，27 个控制变量，6 个干扰量。

因素众多还表现在：大系统既有“物”的因素，又有“人”的因素。既有技术因素，又有经济因素，以及社会因素。而且这些因素常常是变化多端的，具有随机性与模糊性。这在军事系统、经济系统、生态系统是常有的。

因此，所谓“大系统”，是涉及工程技术、社会经济、生物生态等各领域的，规模庞大、结构复杂、功能综合、因素众多的系统。

为了研究不同领域(工程技术、社会经济、生物生态)的各种大系统，需要抽象出它们的共性。因此，大系统理论研究各种大系统的共同规律与方法。比如，大系统的信息结构与控制方案，大系统模型化方法等。它着重研究大系统的控制与信息问题。一方面是对已有的大系统建立数学模型、网络模型或物理模型，进行定性、定量，静态、动态分析。对系统的技术经济性能、社会效果、生态影响作出评价，对系统现有运行状态进行估计，对系统未来发展趋势进行预测等。另一方面，是对尚待筹建的大系统进行决策、规划、设计，对系统的筹建过程与实际运行，进行科学的组织管理与控制，解决大系统的最佳设计、最佳管理、最佳控制问题。

因此，“大系统理论”并不是关于系统大、小的“分类学”。因为系统规模的大小并没有截然的、固定的分界线，是相对的概念，且与人们处理复杂问题的能力，如计算机容量等有关。“大系统理论”是研究各种大系统的控制与信息过程，分析与综合方法的系统科学。

目前的基本内容如图 1 所示:

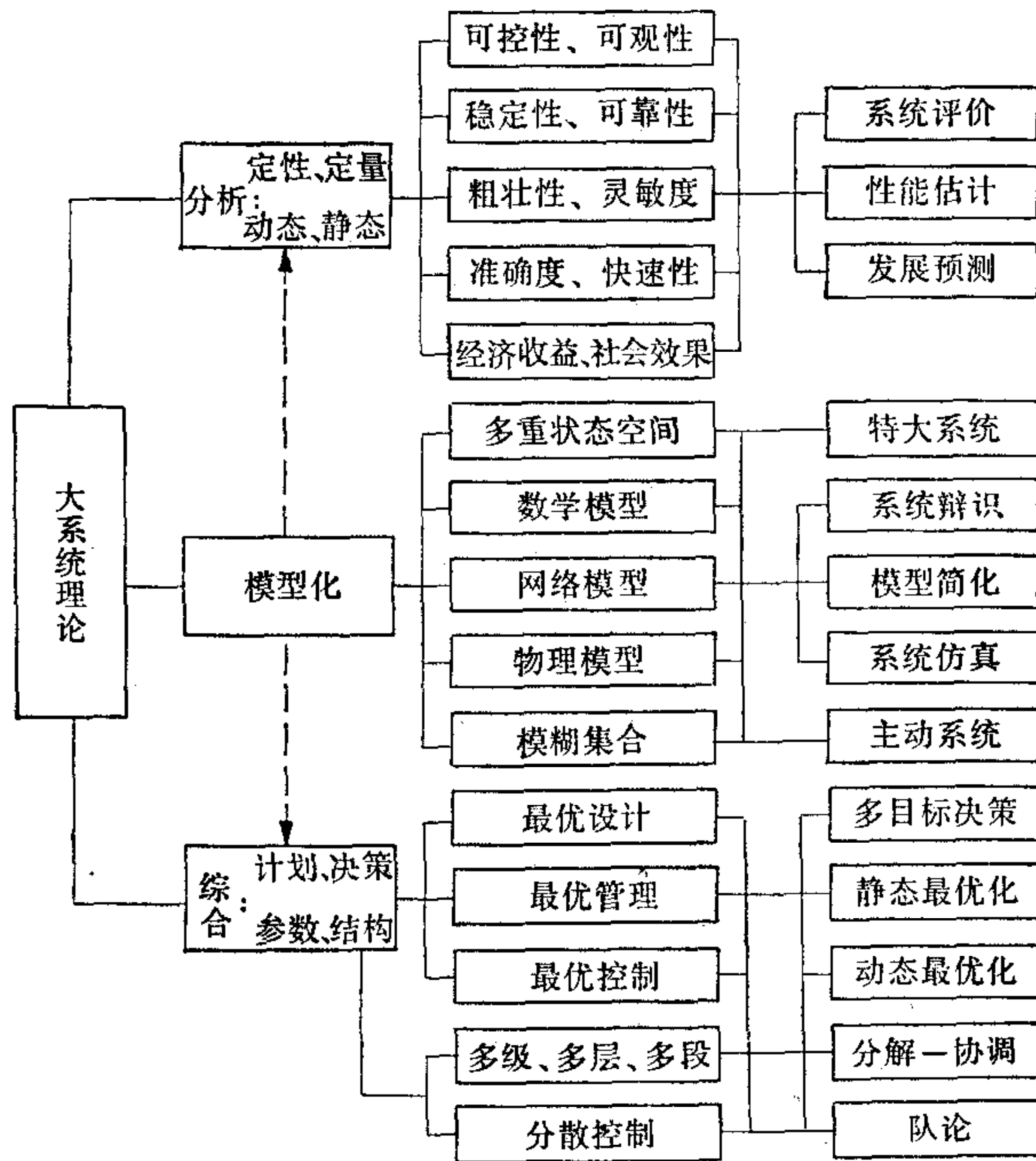


图 1 大系统理论的基本内容

### 三、大系统理论与控制理论

从控制理论 (Control Theory) 的发展过程看来,可以大致划分为三代:

第一代控制理论(四十和五十年代),即所谓“经典”控制理论。它是以单变量控制与调节为主要内容的,如伺服系统理论,自动调节原理等。采用频域法,以传递函数为数学模型。是单机自动化的理论基础。

第二代控制理论(五十和六十年代),即所谓“现代”控制理论。它是以多变量控制、最优控制、自适应控制为主要内容的,采用时域法,以状态方程为数学模型,是过程控制与机组自动化的理论基础。

第三代控制理论(六十和七十年代)。大系统理论与智能控制是它的主要内容,这是生产过程自动化向综合自动化方向发展,电子计算机在国防及国民经济各部门、科学技术各领域广泛应用,自动化学科向广度与深度发展的结果。大系统理论是过程控制与信息处理相结合的综合自动化系统的理论基础。

一方面,大系统理论继承与发展了第二代控制理论的许多成果。实际上大系统与多变量系统并无不可逾越的界限,因此大系统理论在概念与方法上都与多变量控制理论有密切关系。如果不考虑大系统的某些新问题(分散控制、主动系统等),采用状态方程或传递函数描述大系统,那末,第二代控制理论的分析与综合方法,原则上对大系统也是可用的。包括可控性、可观性、稳定性、可靠性、粗壮性、灵敏度、准确度、快速性等概念及分析方法;多变量系统的“自治”调节与“协调”控制原则,最优控制的极大值原理、动态规划方法,稳定性理论的 Lyapunov 函数法,系统实现与零极点配置,以及系统辨识,系统仿真技

术等,都可以在大系统分析与综合中应用.因为在状态方程或传递函数中,状态矩阵或特征方程的阶数( $n$ ),并没有固定的数字, $(n)$ 可以为任意正整数.所以,大系统可看成是 $(n)$ 值较大的多变量系统来处理.

但是,直接应用第二代控制理论解决大系统问题,当系统阶数( $n$ )甚高时,存在技术性的实际困难.因为系统分析综合的计算工作量,随阶数以大于线性的速度增长,比如, $(n)$ 阶矩阵具有 $(n^2)$ 个矩阵元素,可能受到计算机容量或速度的限制,特别是难以满足在线实时控制的需要.同时,采用集中控制方案,用大型计算机,试图“一揽子”解决大系统的管理与控制问题,在技术实现上也往往是不可取的,比如,运行可靠性较差,设备费用较贵,维修与技术更新较难,不便于采用中、小型或微型计算机等.所以,为了解决上述困难,目前沿着二条途径:

### 1. “分解”-“协调”

所谓“分解”,就是把复杂的高维的大系统分解为简单的低维的若干子系统.比如,在“多级”控制方案中,按决策能力、对象结构进行分解;在“多层”控制方案中,按控制任务、功能进行分解;在“多段”控制方案中,按控制过程的时间进行分解,以便应用第二代控制理论解决各小系统的分析与综合问题.

“分解”包括:目标分解,即如何将大系统总目标分解为各小系统的子目标;模型分解,即如何处理数学模型中描述的,由于对象结构或过程物理性质造成的各小系统之间的相互关联,通常采用的分解方法有“非现实法”、“现实法”等.

大系统理论的“分解”与多变量控制理论的“去耦”有类似之处.实质上多变量系统的“自治”调节原则(不相互影响的控制)即“去耦”,可看作是一种特殊的分解方法,它利用控制器之间的关联去抵销对象中的关联,消去数学模型中的耦合项,使系统传递矩阵“对角线”化,从而将多变量大系统分解为自治的单变量小系统.

所谓“协调”,就是要使各小系统相互协调彼此配合,共同完成大系统的总任务,实现总目标.这里要研究协调原则与策略的问题,即根据什么原则进行协调,选取什么协调变量,采用什么算法实现协调,如何加速协调过程的收敛性等.

通常采用二种协调原则:其一是“关联平衡”原则,如图2所示<sup>[6]</sup>.

在图2中,协调器( $C_0$ )观测协调偏差 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ ,控制协调变量 $\beta(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ 使小系统 $(c_1, p_1)$ 与 $(c_2, p_2)$ 相互配合,满足关联平衡条件:

$$\varepsilon_i = d_i(\beta) - u_i(\beta) = 0; \quad i = 1, 2,$$

即局部控制所需关联量 $d_i(\beta)$ 与实际关联量 $u_i(\beta)$ 相等.或者使协调偏差 $(\varepsilon)$ 的某泛函极小:

$$f_\beta(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = f_{\beta \min} |_{\beta = \beta \text{ opt}}$$

即 $d_i(\beta)$ 尽量接近于 $u_i(\beta)$ .

其二是“关联预估”原则,如图3所示.

在图3中,不同的是选取协调变量为预估的关联量 $\alpha_i(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ ,协调偏差为:

$$\varepsilon_i = \alpha_i - u_i(\alpha), \quad i = 1, 2,$$

这里协调控制的作用也是使协调偏差为零 $(\varepsilon_i = 0)$ 或极小化,以满足“关联预估”条件 $\alpha_i = u_i(\alpha)$ ,或使关联量的预估值尽量接近实际值.

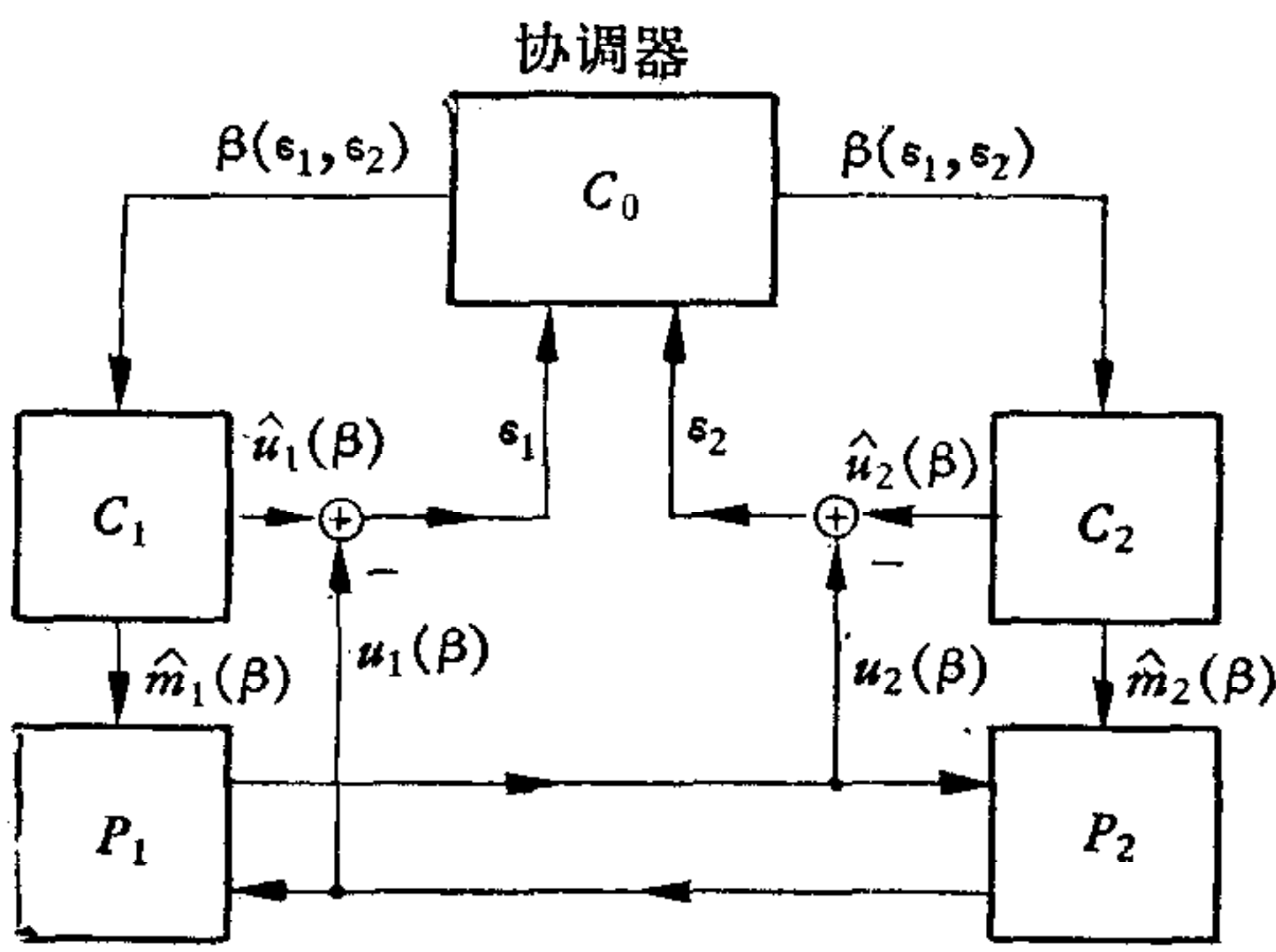


图2 “关联平衡”协调原则

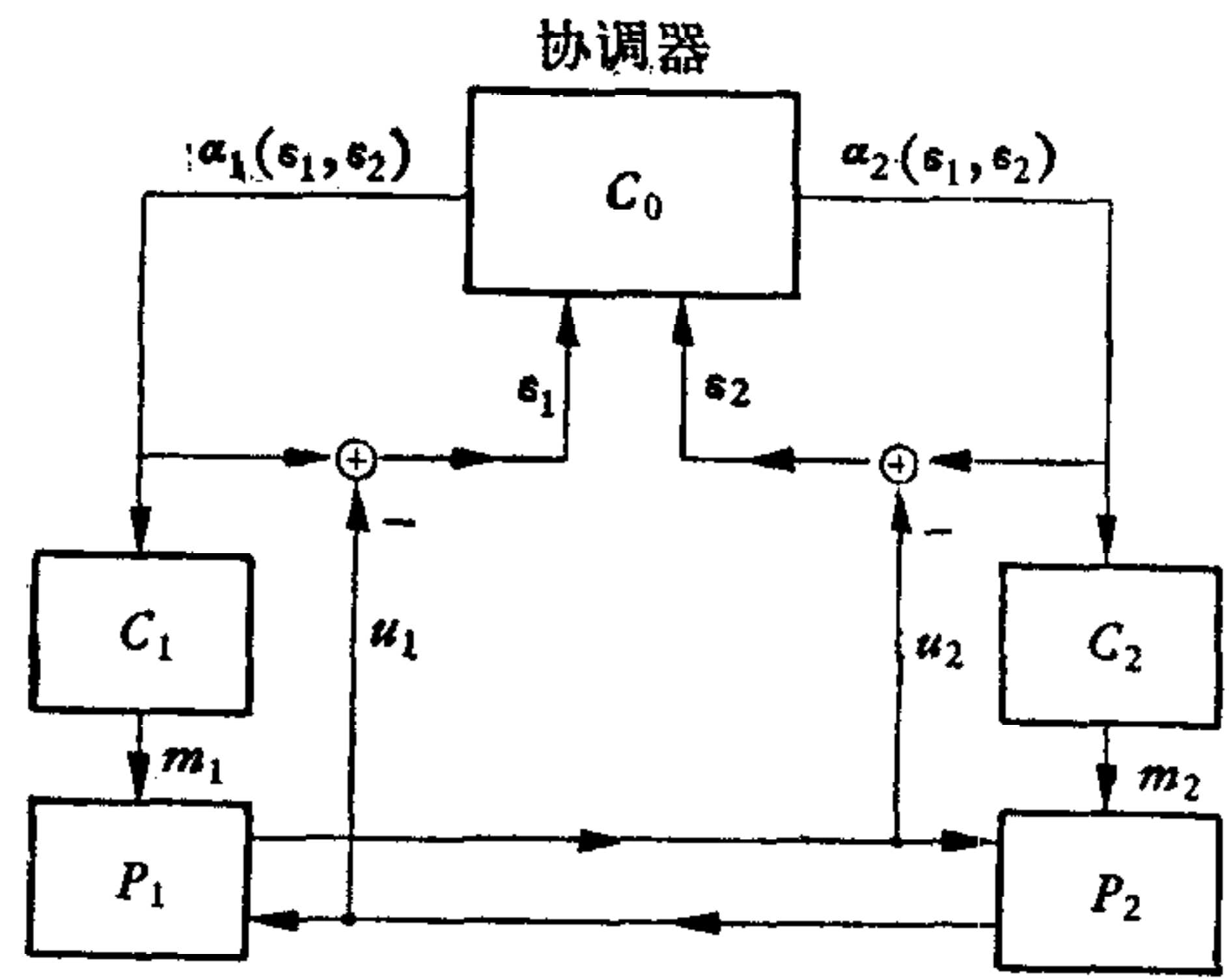


图3 “关联预估”协调原则

上述二种协调原则的共同点,都是按协调偏差进行反馈闭环控制。

在多变量控制中也研究过类似的协调问题,关于多变量系统的协调控制原则,建议按协调偏差进行反馈闭环控制,自行整定“内部给定量”,使各单变量小系统相互协调配合满足给定的多变量协调关系。比如,速度同步关系,负荷平衡关系等<sup>[12]</sup>。

利用“分解-协调”方法,先将大系统“化整为零”,再将各小系统“合零为整”,可以将多变量系统的最优控制理论推广应用,解决大系统的动态最优化问题,设计多级控制的大系统<sup>[5,6,7]</sup>。

### 2. 模型简化

为了简化大系统数学模型,降低状态矩阵阶数 ( $n$ ), 有几种方法,例如:

(1) 集结法: 保留主特征值,用低阶模型代替高阶模型。设  $n$  阶状态方程:

$$\dot{X} = AX + BU$$

令集结变量  $z = Cx$ , 选取集结矩阵  $C$  使它满足动态吻合条件:

$$FC = CA \text{ 及 } G = CB$$

可得简化的  $r$  阶状态方程: ( $r < n$ )。

$$\dot{Z} = FZ + GU$$

集结法的优点是: 集结变量 ( $z$ ) 保留了状态变量 ( $x$ ) 的主要动态特性 (振型), 矩阵 ( $F$ ) 保留矩阵 ( $A$ ) 的主特征值, 缺点是要计算高阶矩阵 ( $A$ ) 的特征值。集结法可看成是根轨迹法中保留主极点的简化方法的发展。

(2) 摄动法。略去高阶方程含有小参数的摄动项获得低阶简化方程,有二种情形:

奇异摄动法——小参数 ( $\epsilon$ ) 出现在方程左侧,如:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + B_1u_1 \\ \epsilon \dot{x}_2 = A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + B_2u_2 \end{cases}$$

略去摄动项,令  $\epsilon = 0$  得简化模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + B_1u_1 \\ 0 = A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + B_2u_2 \end{cases}$$

适用于快、慢动态过程可分离的强耦合的系统。

非奇异摄动法——小参数 ( $\epsilon$ ) 出现在方程右侧如:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = A_{11}x_1 + \varepsilon A_{12}x_2 + B_1u_1 \\ \dot{X}_2 = \varepsilon A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + B_2u_2 \end{cases}$$

略去摄动项,令  $\varepsilon = 0$  得简化模型:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = A_{11}x_1 + B_1u_1 \\ \dot{X}_2 = A_{22}x_2 + B_2u_2 \end{cases}$$

适用于弱耦合的系统。

摄动法是弹道摄动理论在大系统模型简化中的应用,它对线性、非线性系统都可用,但需要系统具有快、慢动态分离或弱耦合特性。

利用简化模型,便于应用第二代控制理论进行大系统的简化分析与综合。

但是另一方面,在大系统实践中提出了不少新问题,仅仅依靠推广第二代控制理论是难以解决的,需要探讨新的方法。(见本文第六节)。同时在生产过程综合自动化系统中,除了与过程控制有关的动态问题(最优控制、稳定性等)外,还有大量与企业组织管理、规划决策等有关的静态问题,如生产计划协调、交通运输路线安排等,需要应用系统工程的运筹学、图论方法,即控制理论与系统工程相结合,解决综合自动化系统的动态、静态的分析与综合问题。

因此,我们认为,大系统理论是第三代控制理论的重要内容,是生产过程综合自动化的理论基础。

#### 四、大系统理论与系统工程

系统工程 (Systems Engineering) 是关于系统规划设计与组织管理的技术,如工程总体设计、企业经营管理、科研计划协调等。它的主要理论方法是运筹学,包括线性规划、非线性规划、对策论……,以及图论方法等。

大系统理论与系统工程有共同之处,系统工程虽然也用于小系统,但主要对象是大系统。因此线性规划、非线性规划、对策论、以及图论等,是目前大系统理论的重要组成部分。比如:

(1) 利用“分解-协调”方法,可以将线性规划、非线性规划推广应用,解决大系统的静态最优化问题,如大型企业的离线的计划管理、交通运输网的规划设计等,采用代数方程或超越函数方程组等数学模型,称之为大规模数学规划方法。

(2) 用对策论方法研究大系统分散控制、多目标决策、主动系统、多级控制等问题,如经济集团中各成员的协作问题,采用“公平游戏原则”(Fair Play Principle)可能是一种有效的策略。

(3) 用图论方法,采用网络模型解决大系统的规划设计与组织管理问题。如大型科研项目计划协调,化工网络、电力网络分析,城市规划等。包括计划评审技术(PERT)、图解评审技术(GERT)等方法。

所以有时候人们将大系统理论与系统工程看成一回事。

但是大系统理论与系统工程也有不同之处。系统工程侧重于静态最优化,工程大系统规划设计与企业经营管理问题;而大系统理论注重动态最优化,包括工程与非工程系统,研究大系统的分析与综合问题。比如:

(1) 大系统最优化包括动态最优化与静态最优化。比如大型生产过程控制与企业管理问题。七十年代以来的动向是由离线(开环)管理向在线(闭环)管理,实时控制发展。例如采用“多层”结构方案的大系统,如图4所示。

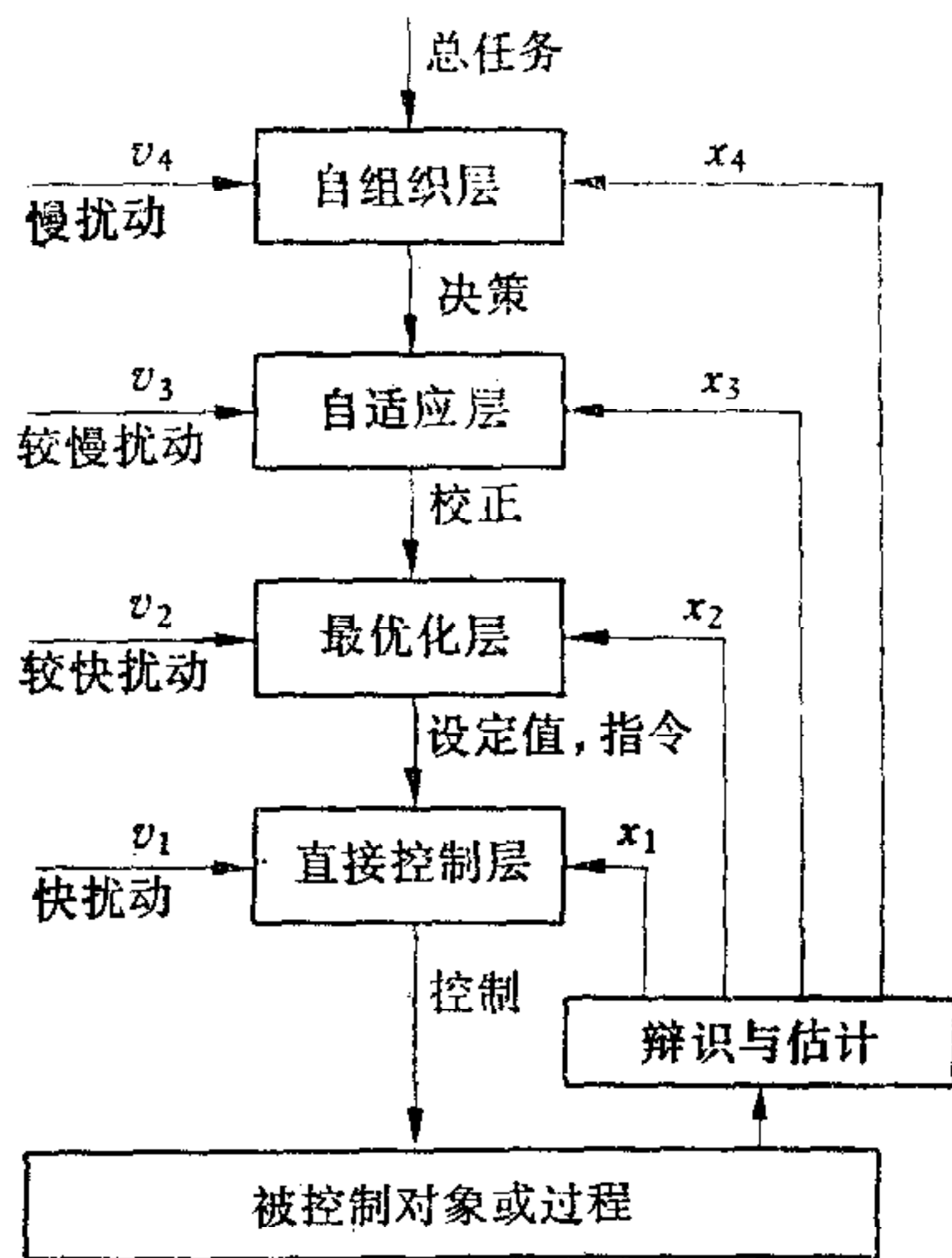


图4 “多层”控制结构方案

在图4中:

第一层: 直接控制层。其任务是根据最优化层设置的定值与指令,直接控制生产过程,克服快扰动的影响。

第二层: 最优化层。根据给定的目标函数、约束条件与数学模型实现动态最优化,克服较快扰动的影响。

第三层: 自适应层。根据自组织层的决策及环境条件的变化,对最优化层的目标函数、约束条件与数学模型进行修正,以适应较慢扰动变化,保持系统最优运行状态。

第四层: 自组织层。根据大系统的总任务、总目标进行计划决策,协调各层工作,克服慢扰动的影响。

通常,第一、二、三层都是在线闭环实时控制系统,

第四层可以是离线的,但也接受来自生产过程的反馈信息。

因此大系统理论着重动态最优化问题。

(2) 非工程大系统,如: 社会经济系统、生物生态系统,环境保护与污染控制系统等。类似于工程大系统,如工业企业、交通运输、电力系统等。根据数学模型的不同,有静态问题,如资源分配计划、城市建设规划、环境监测网设计等,可用数学规划或图论方法解决,但也有许多动态问题。如采用动态经济模型,研究国民经济增长规律,预测发展趋势。又如生态系统,它是由生物与环境通过“食物链”或“呼吸链”等组成的闭环动态系统,如图5所示。

为了解决工程与非工程大系统的动态问题,如动态最优化、稳定性等,需要应用控制理论的概念和方法。

因此,系统工程与控制理论相结合,也在向动态发展,可以说,大系统理论是系统工程发展的新阶段: 动态系统工程。

## 五、大系统理论与控制论

如果说在四十年代末期,由于自动控制、通讯工程、计算技术与神经生理学、病理学等不同学科的相互渗透,以数学为纽带,形成了综合性的边缘学科“控制论”(Cybernetics)。它研究各种控制系统(包括机器和生物有机体)的信息传递、变换、处理过程的共同规律。如反馈原理、全或无定律等。这是人们“从特殊到一般”的一次认识发展过程。

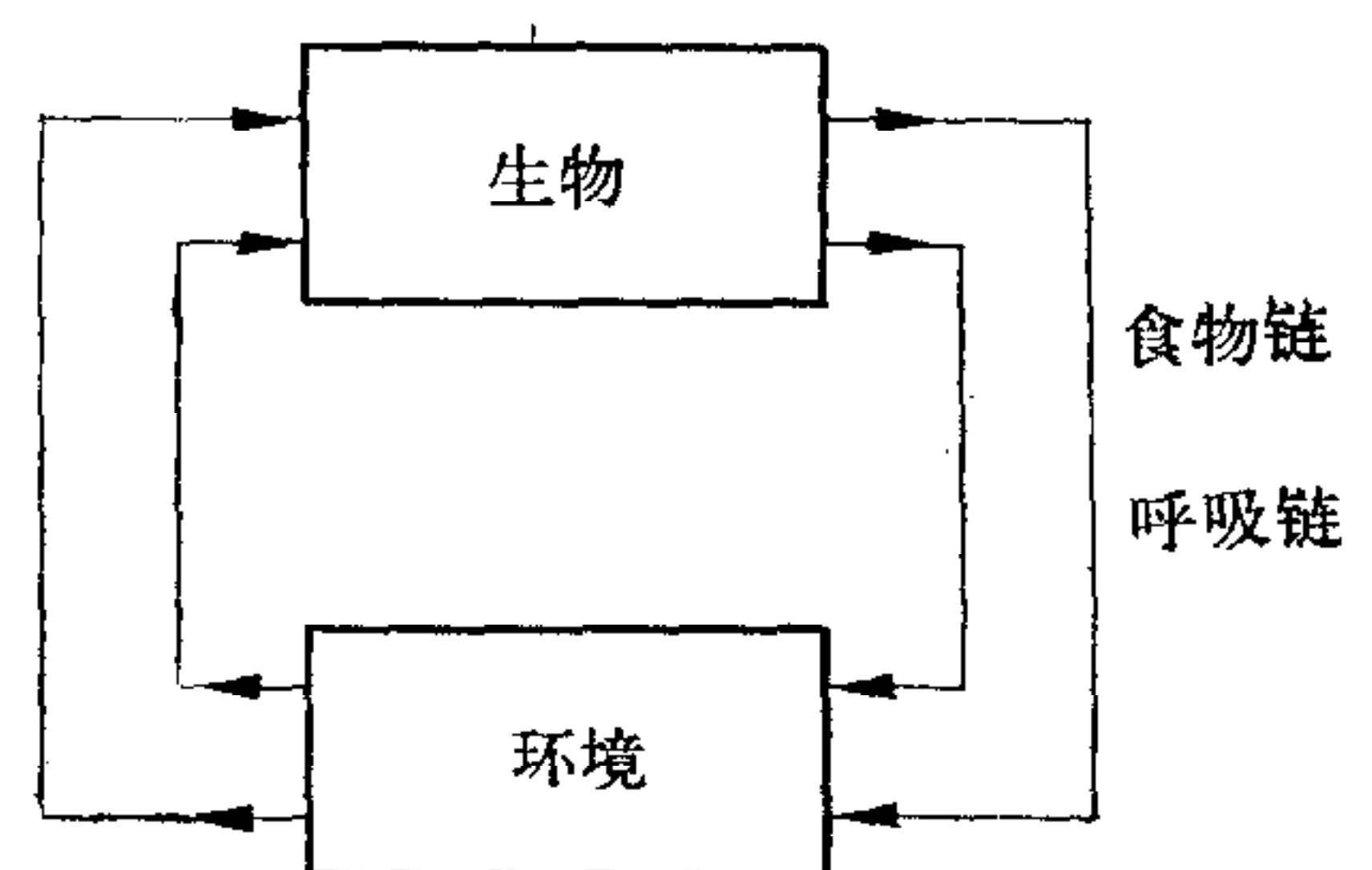


图5 生态系统框图

那末七十年代以来,由于控制理论、系统工程、数据通讯、计算机科学与经济管理、环境科学、系统生物学、生态学等各种不同学科的相互渗透;以数学为纽带,电子计算机为工具,促进了大系统理论的发展. 它研究各种不同领域(包括工程技术、社会经济、生物生态等)大系统的共同规律. 可以说这是人们“从特殊到一般”的又一次认识发展过程.

大系统理论从控制论观点出发,着重从系统整体功能、动态过程、相互关系中,研究各种大系统的控制与信息过程的共同属性、共同问题、共同方法. 如:

### 1. “多级(递阶)”结构<sup>[6,7]</sup>

为了完成同样的任务,大系统可以具有不同的结构方案. 在工程技术、社会经济、生物生态等各种大系统中,一种有普遍意义的结构方案是“多级(递阶)结构”,如图 6 所示.

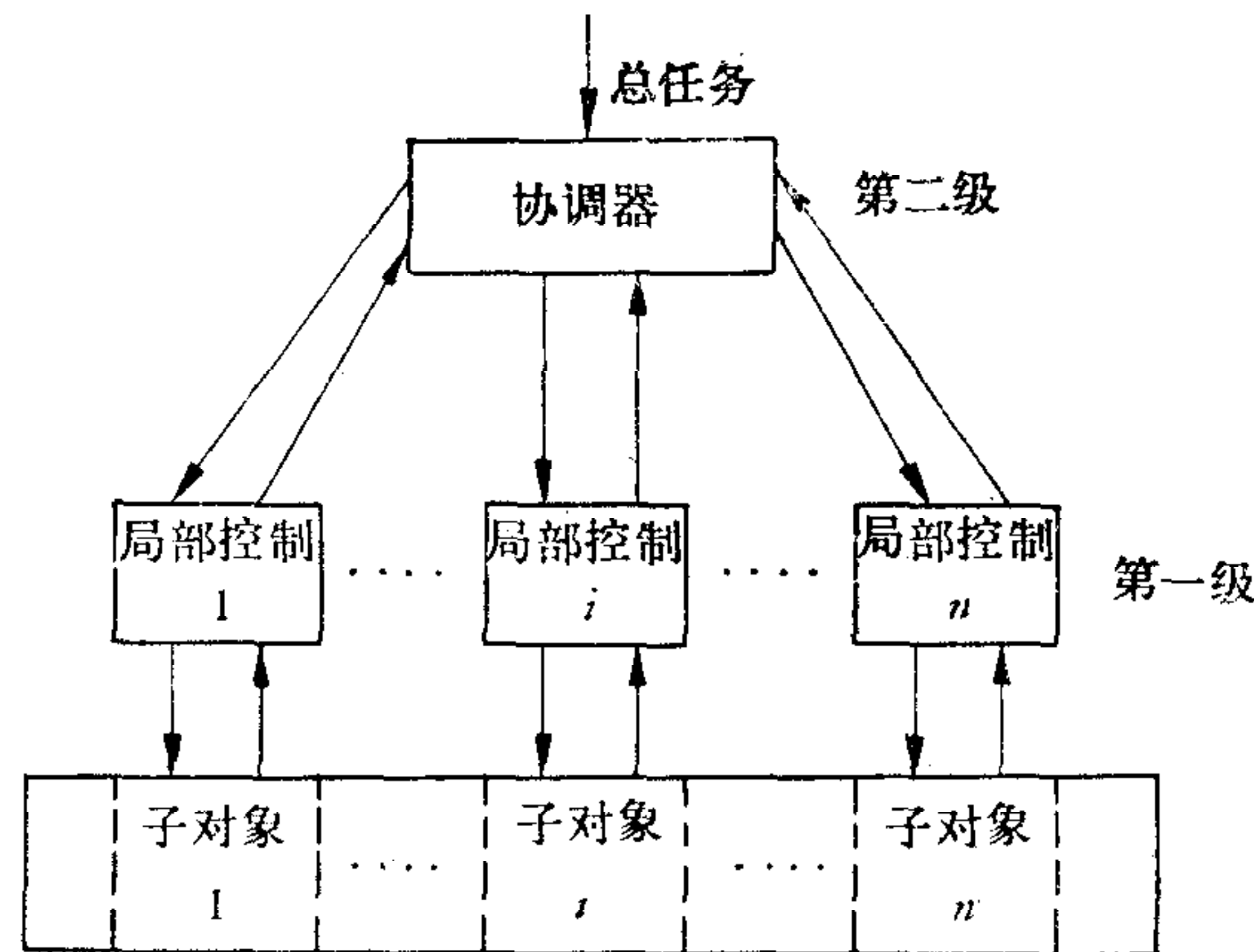


图 6 “多级(递阶)”控制结构方案

在图 6 中,第一级是各局部控制器,它们与相应的子对象构成局部控制小系统. 第二级是协调器,它使各小系统协调配合,共同完成大系统的总任务. 这是二级(递阶)结构. 类似的方式可以递推到三级、四级或多级. 其中,下级是局部的、被领导的、决策能力较小;上级是全局的、领导的、决策能力较大.

在工程技术大系统中,多级递阶结构是现代冶金、化工、石油等生产过程多级计算机管理与控制系统的典型方案. 如第一级是各车间的过程控制级,第二级是各工厂的调度管理级,第三级是公司的计划决策级.

多级(递阶)结构也常见于社会经济大系统,例如,国家行政管理系统、军队组织体系、经济管理机构等. 其中,各下级机构完成局部行政、组织、管理工作,上级机构担负领导、指挥、协调的工作. 下级服从上级,上级比下级有更大的职权.

生物大系统也具有多级递阶的结构方案. 例如人的神经系统,有中枢神经与外周神经,中枢神经又分为高级中枢(如大脑皮层等)与低级中枢(脊髓),而脊髓又包括颈、胸、腰、骶、尾等 31 个神经节段. 构成控制整个人体生命活动的多级(递阶)大系统.

有趣的是:随着生产过程自动化的进展,由单台计算机的集中控制方案发展为多台计算机的多级递阶控制方案;随着社会进步,行政、军事、经济组织也由个人独裁的方式发展为分级管理的方式;随着生物进化,生物控制系统也由单神经节发展为多级、多节段的神经系统. 这种发展过程的类似性是值得注意并富有启发的. 同时也说明“多级(递阶)”



结构是各种大系统的共同属性之一。

## 2. “大-小系统关系”问题<sup>[8,12]</sup>

因为大系统常常都是由许多小系统借相互关联所组成的。所以在大系统理论中一个重要的共同问题是：“大-小系统关系”问题。

比如，“大-小系统稳定性关系”问题：若各小系统稳定，其相互关联应满足什么条件，所组成的大系统也是稳定的？反之，若小系统不稳定，大系统能否稳定？由不稳定的小系统组成稳定的大系统，其相互关联应满足什么条件？

目前，大系统稳定性分析有：矢量 Lyapunov 函数法、加权和 Lyapunov 函数法及“输入-输出”稳定性方法等，这些方法进行大系统稳定性分析的共同步骤是：

(1) 设大系统由各小系统相互关联所组成，建立各小系统及其关联的数学模型。如：

$$\dot{X}_i = p_i X_i + \sum_{j \neq i}^s e_{ij} Q_{ij} X_j, \quad i = 1, 2, \dots, s,$$

式中，关联矩阵  $E = [e_{ij}]$ 。

(2) 不计相互关联(令  $E = 0$  得  $\dot{X}_i = p_i x_i$ )，求得小系统的稳定条件。如：

$$\begin{aligned} \eta_{i1} \|x_i\| \leq V_i(x_i) \leq \eta_{i2} \|x_i\| \\ \dot{V}_{i\neq}(x_i) \leq -\eta_{i3} V_i(x_i) \\ \|\text{grad } V_i(x_i)\| \leq \eta_{i4} \end{aligned}$$

式中， $V_i(x_i)$ ——第  $i$  个小系统的 Lyapunov 函数。

(3) 考虑相互关联 ( $E \neq 0$ )，在小系统稳定条件基础上，给出对关联的约束条件，得到大系统的稳定条件。如矢量微分不等式：

$$\dot{V} \leq A \cdot V$$

式中： $V = (V_1, V_2, \dots, V_s)^T$  大系统的矢量 Lyapunov 函数。

$A = [a_{ij}]$  为集结矩阵，满足不等式约束条件：

$$(-1)^k \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{kk} \end{vmatrix} > 0; \quad k = 1, 2, \dots, s.$$

类似地我们还可以提出：“大-小系统可控性、可观性关系”，“大-小系统粗壮性关系”，“大-小系统可靠性关系”等问题。用类似的思路和步骤来解决这些问题。

## 3. 大系统模型化

为了研究各种大系统的共同规律，需要有通用的共同方法。给实际系统建立数学模型、网络模型或物理模型，称为模型化 (Modelling)。

通常建立数学模型有二种方法：

(1) 演绎推理法。从物理学、经济学、生物学基本原理出发，根据已知系统结构与参数，通过演绎推理建立模型可得到唯一解，但要求详细了解实际系统；

(2) 实验归纳法。利用对系统进行主动或被动实验观测的输入、输出数据，用归纳法建立系统的“等效”模型，不需要详细了解实际系统结构与参数，但所得的解不是唯一的。

由于大系统的复杂性，详细了解系统与大量进行实验均有困难，实际上是二种方法相

结合,用推理法决定模型结构,用实验法进行系统参数辨识。同时,大系统是由小系统相互关联所组成,可以在小系统模型化基础上,通过对关联的辨识建立大系统的模型。

有了数学模型,一方面可以进行理论分析与综合,另一方面可用电子计算机或物理模型进行系统仿真试验,模拟实际系统的动态过程。这对于工程或非工程大系统都是可行的共同方法。

大系统模型化是控制论的“黑箱”观点与“类比”方法的具体运用。

大系统理论从控制论观点出发,研究工程技术、社会经济、生物生态等各种大系统的共同属性、问题和方法。因此,可以认为,大系统理论是控制论的新分支:大系统控制论。

## 六、大系统理论的特殊问题

在大系统的实践中提出了不少新问题,需要探讨新的系统描述、分析与综合方法。

### 1. 特大系统

如果系统规模特大,结构极复杂,所包含的小系统不只是几百、几千,而是几万、几亿,称之为特大系统。比如,人类脑组织是包含  $10^{11}$  个小系统(脑细胞)的特大系统。

对于特大系统,想用通常方法直接从各小系统状态来描述大系统是很困难的,这好象是想用每个分子的运动来描述整个气体状态,是繁琐而不现实的。比如一个脑细胞用一阶方程,那末整个脑组织的方程将是  $10^{11}$  阶。但是,能否象平常描述气体宏观状态(温度、压力)那样,不管个别分子的运动呢?也不适当。因为,脑组织是有高度组织性的有机体。所以为了研究人类脑组织,既要分析脑细胞的微观运动,也要研究脑组织的宏观状态。传统方法是把脑细胞看成是简单的“二态”元件,用布尔代数描述神经网络,研究简化的脑模型(自动机)。但是,细胞动力学的进展表明,神经细胞是具有阈特性、时空整合、可塑性、不应期与疲劳效应的小系统,相当于生物信息的微处理机。因此,需要探讨这类特大系统的新的描述方法。

考虑到许多实际的特大系统,常具有多级递阶结构方式,采用“多级矢量”的“多重状态空间”描述是一条可能的途径。

### 2. 主动系统

所谓主动系统(Active System)是指包含有主动环节(例如:人)的系统,如由管理操作人员与机器设备组成的“人-机”系统;社会经济领域中的“人-人”系统。

这里主要困难是“人环节”特性的描述问题。在“人-机”系统研究中,传统的方法是采用传递函数,例如:

$$K(s) = \frac{K_0 e^{-\tau s}}{1 + Ts}$$

来描述操作人员的特性。这在某些手动操作控制的场合是可用的,有相当的局限性。

但是,在大系统中常涉及到人在计划决策、组织管理方面的特性,由于人的思维、语言和行为有很大的不确定性与个体差异,所以采用传递函数、状态方程等确定性数学方法来进行描述是有困难的。

人的特性的不确定性表现为二方面:随机性与模糊性。这二者是不同的,在随机性

中,事件本身是确定的,但事件发生与否是不确定的,以某种概率随机地发生. 比如,某人明天生病的概率是 0.1. 它反映各种内外随机因素对人的影响,如气候、食物、环境……等. 这需要用概率统计方法研究. 而模糊性中,事件存在与否是确定的,但事件本身是不确定的,具有某种模糊概念. 比如,人在判断某事件的好坏时,常说:“特别好”,“相当好”,“比较好”,“比较差”,“相当差”,“特别差”. 这些概念并无明确界限,具有模糊性. 它反映了人的思维逻辑上的模糊性. 可用模糊集合论 (Fuzzy Set) 方法进行描述. 例如,用模糊集方法研究如何合理分配人员工作,使整个组织机构工作效率最高. 所得结果便于语言表达,但不是严格的最优解<sup>[11,21]</sup>.

### 3. 分散控制<sup>[4]</sup>

近来,分散控制 (Decentralized Control) 受到很大重视. 由于实际条件限制许多大系统是分散控制的. 例如,城市交通管理系统. 分散控制结构方案如图 7 所示:

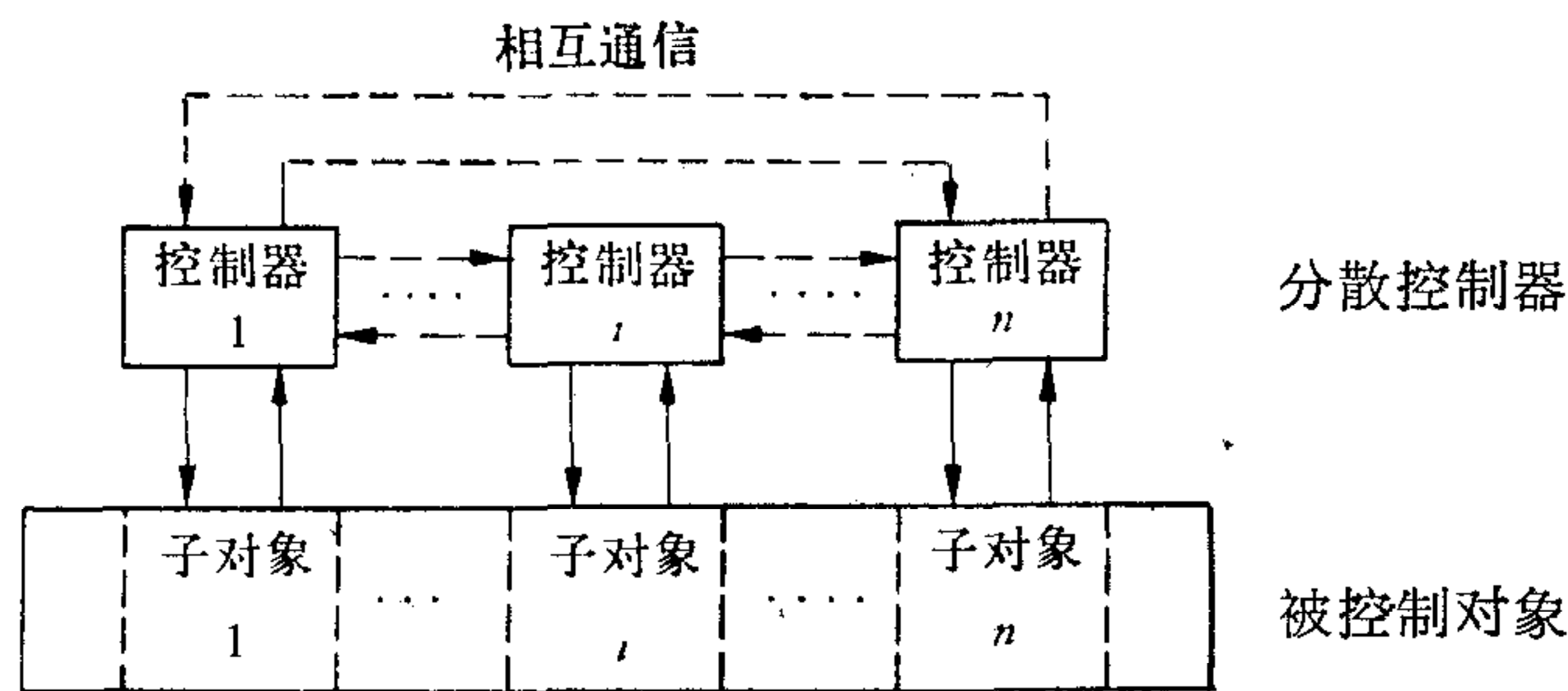


图 7 分散控制结构方案

在图 7 中,各分散控制器只能获得关于被控制对象或过程的部分信息,也只能对过程进行局部的控制. 在各分散控制器之间可以进行相互通信,以便相互协调完成大系统的总任务. 由于控制任务分散,信息分散,所以与集中控制 (Central control) 比较,分散控制可以减少通信困难与费用,提高可靠性,便于用中、小型和微型计算机实现.

分散控制不同于集中控制的特点在于:“非经典信息模式”. 如:

- (1) “完全分散”式: 各分散控制器信息结构都不相同.
- (2) “部份分散”式: 有一部份控制器信息结构相同.
- (3) “完全不通信”式: 各分散控制器之间无通信联系.
- (4) “部份通信”式: 有一部份控制器之间有通信联系.

而集中控制具有“经典信息模式”,控制器可以获得被控制过程的全部信息,也可对整个过程进行控制. 即集中完全通信的信息模式.

分散控制也不同于多级递阶控制. 这里没有上一级的协调器. 在分散控制中,大系统总任务分配给各分散控制器,依靠各控制器之间相互通信进行协调.

分散控制的最优化问题与通常最优化问题不同. 这里除了要选取最优控制函数,还要选取最优信息结构. 即各分散控制器的任务分配、信息分散及相互通信的方式.

传统的最优控制及数学规划方法是以经典信息模式为前提的. 因此,为了解决分散控制最优化问题,需要采用新的方法. 如“队论” (Team Theory) 方法. 一个系统中有若干个控制者(或决策者),为实现共同的目标,依据各自具有的信息模式进行控制,这个系

统称之为“队”。有静态“队”与动态“队”理论，分别用于分散控制系统的静态与动态最优化。即在给定的约束条件下，选取最优信息结构与控制函数，使目标泛函极小化（或极大）。例如，交通管理系统的最大网络流问题<sup>[10,4]</sup>。

## 七、结 论

由于生产过程自动化向综合自动化发展，电子计算机在国防及国民经济各部门与科学技术各领域广泛应用，控制与信息科学、经济管理科学、生物与生态学等各学科的相互渗透，各种工程、非工程大系统的实际需要，促进了大系统理论的发展。从控制论观点出发，在控制理论与系统工程相结合的基础上，形成了目前大系统理论的基本内容。如图 8 所示。

大系统理论不是关于系统大、小的分类学，而是处理各种复杂控制与信息问题的方法学，是研究规模庞大、结构复杂、功能综合、影响众多的各种大系统的分析与综合的系统科学。它可以看作是第三代控制理论的重要内容，是综合自动化的理论基础；也可以认为它是系统工程发展的新阶段：动态系统工程是控制论的新分支：大系统控制论。

大系统实践中提出不少新问题，如特大系统、主动系统、分散控制等，需要探讨新理论、新方法，如多重状态空间、模糊集合、“队”理论等。这将不断丰富大系统理论的内容，大系统理论正处在发展中，预计今后若干年仍是十分活跃的领导。

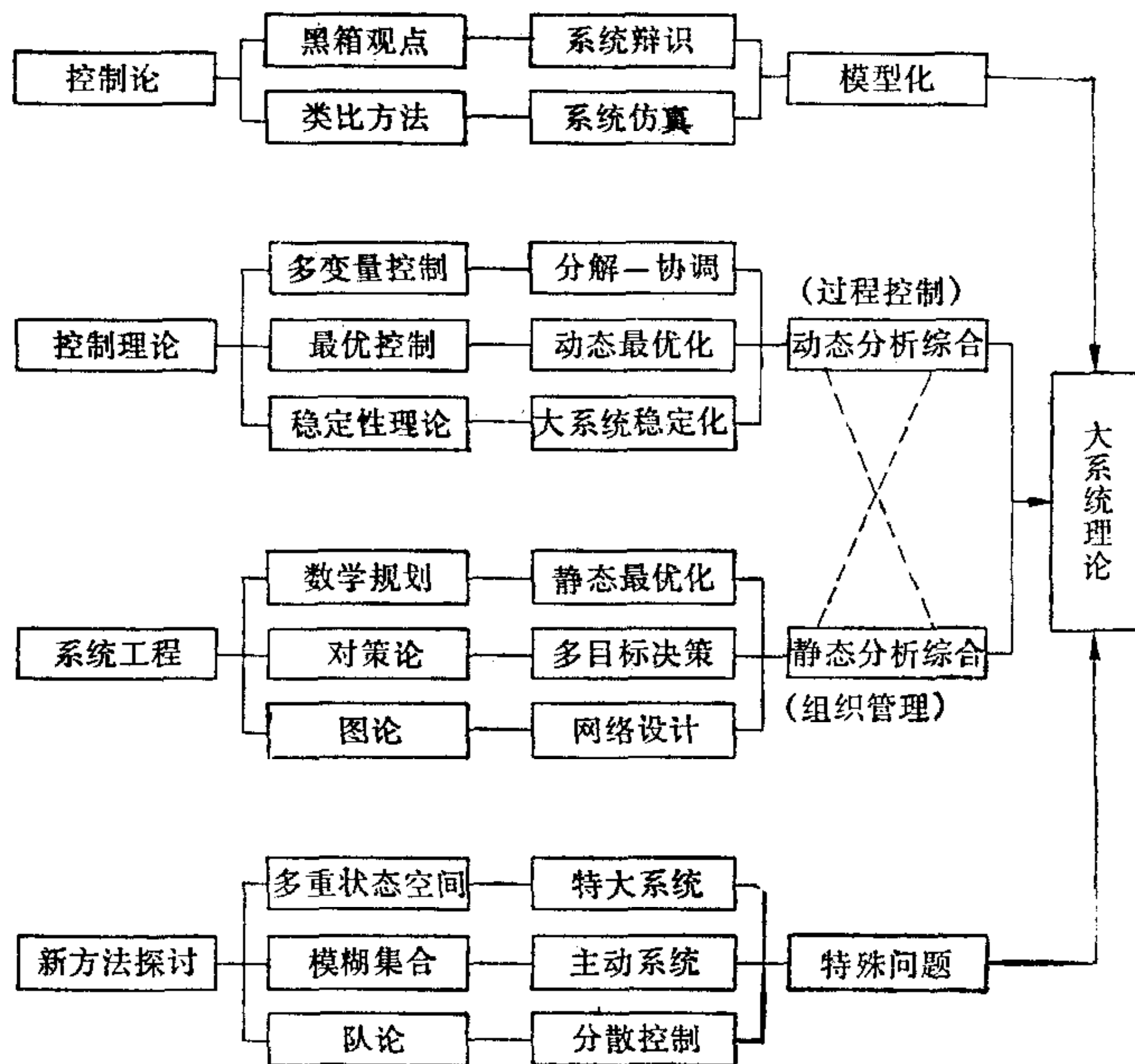


图 8 大系统理论的方法来源

## 参 考 文 献

[1] Preprints of the 6th Triennial World Congress of IFAC, August, (1975).  
 [2] Large Scale Systems Theory and Applications, Proceedings of the IFAC Symposium, June, (1976).  
 [3] Preprints of the 7th Triennial World Congress of IFAC, June, (1978).

- [4] Special Issue on Large Scale Systems and Decentralized Control *IEEE Trans*, AC-23, (1978), April, No. 2.
- [5] D. A. Wisman ed., Optimization Methods and Applications for Large Scale Systems, New York, (1971).
- [6] M. D. Mesarovic, et al., Theory of Hierarchical Multilevel Systems, New York, (1970).
- [7] M. G. Singh, Dynamical Hierarchical Control, (1977).
- [8] A. N. Michel, et al., Qualitative Analysis of Large Scale Dynamic Systems, (1977).
- [9] A. P. Sage, Methodology for Large Scale Systems, (1977).
- [10] Y. C. Ho, K. C. Chu, Team Decision Theory and Information Structures in Optimal Control Problems, *IEEE Trans*. AC-17 (1972).
- [11] L. A. Zadeh, et al., Fuzzy Sets and Their Applications to Cognitive and Decision Processes, (1975).
- [12] Tu Xu-yen, Theory of an Harmonically Acting Control System with a Large Number of Controlled Variables, Proceedings of the 1st International Congress of IFAC, (1960).

## SOME PROBLEMS FOR LARGE SCALE SYSTEMS THEORY

TU XU-YEN

(*Institute of Automation, Academy of Sciences of China*)

### ABSTRACT

In this paper, some problems for Large Scale Systems theory are discussed. There are: what the Large Scale System (LSS) is; the relationship between LSS' theory and control theory; the relationship between LSS' theory and System Engineering; the relationship between LSS' theory and Cybernetics; the special problems of LSS' theory.

In author's opinion, LSS' theory is the important part of the third age of control theory, i.e. the fundamental of the total complex automation. On the other hand, LSS' theory is the new stage of development Systems Engineering — Dynamical Systems Engineering. It may also be said, LSS' theory is the new branch of cybernetics — LSS' Cybernetics.

LSS' theory is not the classification of the size of various systems, but it's the methodology of the analysis and synthesis of large complex control and information system. It is the system science of large scale systems.