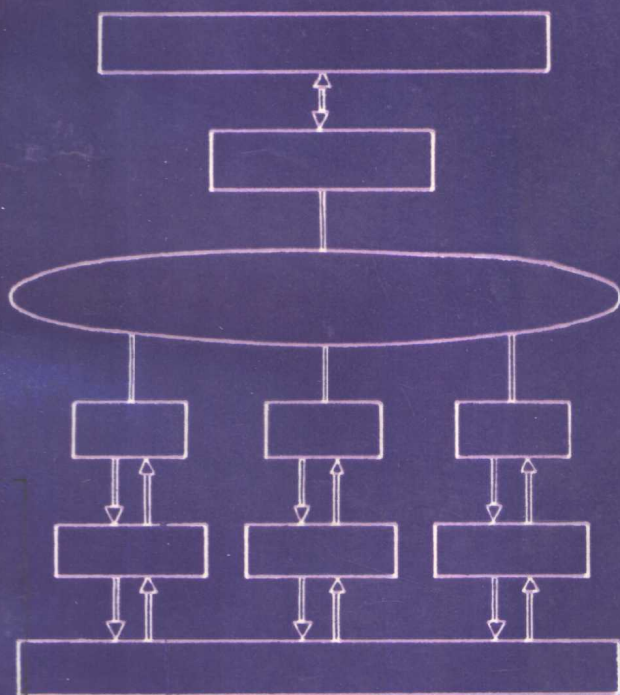


大系统控制

—方法和技術

王 翼 张朝池 编著



天津大学出版社

大系统控制

—方法和技术

王翼 编著
张朝池

天津大学出版社

内 容 简 介

本书从方法与技术的角度讲述大系统的控制问题。全书包括：大系统的镇定、极点配置、递阶控制、分散控制和大系统新近发展起来的几个有广阔应用前景的内容：直接分解协调法、递阶智能控制、多机控制系统的信息选取等。结合所讲的方法有大系统在电力、交通管理、河流污染管理和机器人等方面应用的实例。

本书取材新颖、内容丰富、深入浅出、注重应用，可作为高等院校自动控制理论及应用、系统工程和经济管理等专业研究生和本科生的教材、教学参考书，也可供从事各类系统控制和管理的技术人员参考。

(津)新登字012号

大系统控制

——方法和技术

王翼 张朝池 编著

*

天津大学出版社出版

(天津大学内)

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本：850×1168毫米 1/32 印张：10³/4 字数：279千字

1993年9月第 一 版 1993年9月第 一 次印刷

印数：1—2000

ISBN 7-5618-0526-8

TP·51 定价：8.40 元

序

随着人类社会的不断进步，科学技术、生产实践和社会生活中提出的控制问题，其对象的规模越来越大，系统的结构越来越复杂。人们发现通常的控制方法已不适用于这样的大规模系统。于是自然地出现了探讨大系统理论和方法的新动向。特别是近十多年来，国内外学术界对大系统及其控制的研究非常活跃，并且取得许多重要成果。反映在教学上，许多高等院校在自动控制理论及应用、系统工程和经济管理等专业的研究生班上设置了《大系统控制》课程，相应的本科生班也开设《大系统控制》选修课。本书的目的是为这方面的课程提供一本教材、教学参考书，也为从事各类系统控制和管理的技术人员提供一本有关大系统方法和技术的读物。

本书除讲述大系统的镇定、极点配置、递阶控制和分散控制外，相当大的篇幅是介绍大系统的几个非常实用而极具生命力的新领域。例如第六章中的直接分解法，它有可能使相当广泛的一类大系统实现在线反馈控制；第九章中的递阶智能控制，它使基于模型的控制和基于知识的控制结合起来，从而可以用来控制象机器人这样的相当复杂的系统。有的新课题的研究成果还不十分成熟，然而从发展来看，它们是值得重视的。如第十章所述的建立在计算机网上的多机控制系统的信息选取问题。这个问题国内外研究成果还不多。但由于分布式控制系统的广泛采用，它的研究将越来越显示出重要性。

由于大系统控制的研究还在进展，新成果不断发表，涉及面很广，加之作者水平有限，本书在内容选择、编排和论述方面一定存在不少不足之处，恳请读者批评指正。

编著者

1992年9月

ABD 63/02

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 大系统的基本概念	(1)
§ 1.2 大系统研究的基本问题	(5)
§ 1.3 本书的目的和主要内容	(7)
第二章 组合系统的分散镇定	(10)
§ 2.1 状态反馈分散镇定	(11)
§ 2.2 输出反馈分散镇定	(22)
第三章 分散控制系统的镇定	(28)
§ 3.1 分散控制系统的固定模	(29)
§ 3.2 分散镇定和极点配置	(39)
§ 3.3 分散信息结构下的能控性	(53)
§ 3.4 结构固定模	(63)
第四章 大系统的递阶控制	(68)
§ 4.1 非线性规划强对偶性定理	(68)
§ 4.2 离散线性大系统的目标协调法	(74)
§ 4.3 离散线性大系统的关联预估法	(94)
§ 4.4 连续线性系统的递阶控制	(99)
第五章 分散系统的最优控制	(116)
§ 5.1 动态队	(117)
§ 5.2 分散控制系统	(127)
§ 5.3 分散控制器的参数最优化	(138)
第六章 直接分解法	(153)
§ 6.1 直接分解协调法	(159)

§ 6.2	应用于线性二次型问题	(163)
§ 6.3	组合线性系统的分散控制	(168)
§ 6.4	反馈部分的最优化	(172)
§ 6.5	直接分解协调法的应用	(175)
§ 6.6	松弛技术	(185)
§ 6.7	推广到时滞线性系统	(189)
§ 6.8	推广到非线性系统	(196)
§ 6.9	两层控制系统的实时执行	(203)
第七章	鲁棒分散控制	(213)
§ 7.1	鲁棒分散伺服控制器	(213)
§ 7.2	系统模型未知时的鲁棒分散控制	(223)
§ 7.3	结构扰动系统的鲁棒分散控制	(231)
第八章	大系统的结构特性	(240)
§ 8.1	大系统的 Lyapunov 稳定性	(240)
§ 8.2	大系统的输入输出稳定性	(261)
§ 8.3	大系统的能控性与能观测性	(270)
§ 8.4	结构能控性与结构能观测性	(283)
第九章	递阶智能控制系统	(294)
§ 9.1	递阶智能控制系统	(295)
§ 9.2	在机器人控制中的应用	(306)
§ 9.3	仿真结果	(315)
第十章	大系统计算机控制的几个问题	(321)
§ 10.1	计算机与控制论	(321)
§ 10.2	分布式控制系统	(322)
§ 10.3	局部区域网对大系统理论的影响	(327)
§ 10.4	适用于局域网的优化综合方法	(329)

第一章 绪 论

随着人类社会的不断进步和发展，随着社会生产和科学技术水平的不断提高，生产和社会生活中提出的控制和管理问题的规模越来越大。控制系统的结构也越来越复杂。通常的控制理论与方法不能适用于这样大规模的复杂系统的建模、分析与设计，因而引起了人们对大系统理论与方法研究的极大兴趣。

大系统的控制问题广泛出现于工业过程、经济管理、交通运输、电网控制、生态环境等很多领域，因此在60年代初有人提出“大系统理论”一词以后很快就受到了广大控制论专家的重视，到70年代就逐渐成为一个专门的领域。经过近30年的努力，大系统控制的研究取得了很大的进展并已广泛应用于上述的各个方面。但是由于问题的复杂性，大系统理论的发展还没有达到成熟的阶段，还没有形成一套完整的理论与方法，很多问题需要进一步研究。

本章介绍大系统的基本概念、主要特征和大系统控制研究的主要问题。

§ 1.1 大系统的基本概念

通常说大系统是指大规模控制系统，顾名思义，就是控制系统的规模很大。那么多大才算大呢？规模大是不是它的主要特征呢？

一种意见认为：如果一个系统由于规模大，使得通常的控制理论的技术不能成功地应用于这个系统，即不能以适当的计算时间和存储量来解决这个系统的建模、分析和控制等问题，就称这个系统

是一个大规模控制系统。

这里说的规模大是指系统的维数高，而不是宏观上看一个装置的尺寸。例如人的脑组织是一个由100亿个神经细胞组成的特大系统，但它的外观尺寸并不大。

按这种定义理解大系统的概念显然与可用的计算机的运算速度和存储容量有关。你用的计算机速度快、容量大，你就能在可接受的时间内用通常的控制理论解决大一些的控制问题。

大系统的另一种定义是从系统结构的复杂性考虑的。这种看法认为：如果一个系统是由若干个互相关联的子系统构成的，或者说，该系统是由多个控制器一起来实现它的控制，就称这个系统是一个大规模控制系统。有时为了强调结构复杂，称之为复杂控制系统。

随着计算机技术的发展，人们把多台计算机用于一个控制系统，多台计算机分工合作完成一个控制或管理任务，构成一个大系统。特别是在微处理器的处理能力不断提高，价格大幅度下降的情况下，可以用一台计算机和多台微处理器联成局部网构成一个能在大范围内采集数据、处理数据、分析情况进而实现控制与管理的大系统。这种系统更为实用，更受到各界的重视。

上面给出的两种定义是从两个不同的角度定义了大系统。下面我们进一步分析大规模控制系统的几个特征，从这些基本特征可以帮助我们进一步理解什么是大系统。

从控制的角度分析大系统有以下的基本特征。

1. 模型维数高

系统模型的维数高使得系统的分析设计和仿真需要过多的计算时间和存储空间。现代控制理论的很多算法当维数增大时计算量急剧增大，形成“维数灾难”。动态规划法存在维数灾难问题是大家熟知的。常见的线性二次型问题的最优控制的计算，主要是解由 $n(n+1)/2$ 个非线性微分方程组成的方程组。当 $n > 20$ 时它将包含200多个方程，这对现在一般采用的计算机就显得太大了，何况

有的大系统维数还要高的多。

自动控制中还有一些计算在维数高时，因计算机字长有限会引进较大的误差使计算结果严重失真。这些问题在研究大系统时都是需要解决的。

2. 包含若干互相关联的子系统

很多大系统都自然地包含若干个互相关联的子系统。大系统的整体特性既依赖于各子系统的特性又依赖于子系统之间的关联关系。这样的系统常常自然地形成一个递阶结构。递阶结构的示意图在图1-1中给出。大系统有一个总目标，各子系统有自己独立的目标。不同级之间有信息交换。由上向下的信息对较下级的子系统应视为命令，下级子系统向上的信息是汇报本子系统的情况。

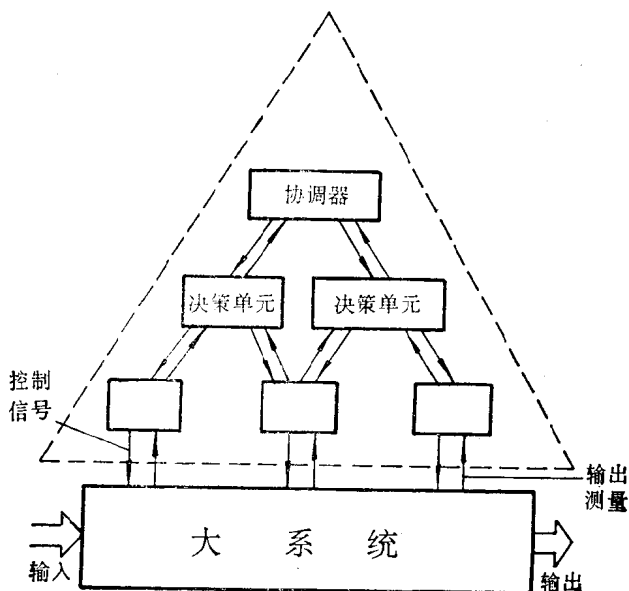


图 1-1 大系统的递阶结构

3. 系统可能分布在地理上不同的地区

有一类系统是由处于不同地理位置的多个子系统构成的。例如，一个地区的电网系统由处于不同城市的发电厂和变电站构成。处于不同地理位置上的子系统有自己的控制站。由于距离远，交换信息的费用高，各控制站只能根据局部信息决定自己的控制。这样的系统在信息结构和控制结构上都受到约束。因此传统的设计方法不能直接应用。

4. 系统模型存在不同的时标

一些大系统呈递阶结构。在不同的级上时标可能相差很大。例如一个生产过程的管理与控制系统是一个复杂的递阶系统。它的最上面一级是计划级，负责规划全厂的生产计划，时间单位为年。下面一级是管理与控制级，负责按排厂方下达的任务，确定最优工艺参数下达给下一级，其时间单位可能是月或周。最下面是现场控制级实现某些量的控制和数据采集，其时间单位可能是分或秒。在一个大系统中时标差别可以很大。

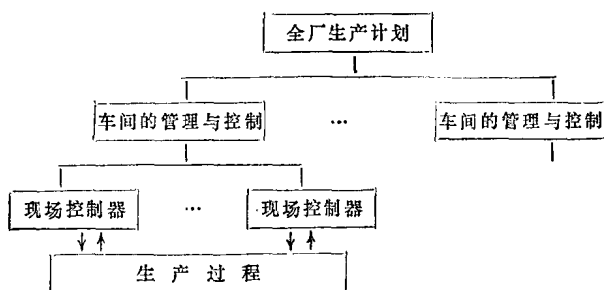


图 1-2 全厂管理与控制系统

5. 多目标性

设计通常控制系统的目标可以用一个性能指标来描述。有的控制系统既要求达到一定精度又要求控制能量不太大，也可以用一个目标函数来描述。有的大系统则必需考虑多个目标才能全面描述对控制系统的要求。

6. 大系统研究涉及多种学科

由于大系统的复杂性，大系统的理论与方法汲取了控制理论、

信息科学、计算机科学、运筹学、人工智能和数学等领域的丰富成果。大系统的研究是多学科的交叉。特别是近来兴起并已被广泛应用的分布式控制系统，把计算机科学、人工智能和控制论紧密地联系起来，形成了生产过程控制的主流。

§ 1.2 大系统研究的基本问题

大系统的研究涉及到的问题很多，下面介绍几个最重要、最基本的问题。

1. 建模与模型简化

大系统模型的建立比较复杂，包括明确大系统的结构，建立大系统各部分（子系统）的数学模型，确定各部分（子系统）间的关联关系，模型中待定参数的辨识等问题。

描述一个大系统的数学模型客观上存在着两个矛盾着的因素“简单”和“精确”。因为影响系统的因素很多，详细考虑所有这些因素可能使数学模型过于复杂，甚至不能依据它对控制系统进行分析和设计。如果模型过于简单又可能不能很好地描述对象而导致不正确的结论。模型简化的任务是适当简化模型，使大系统的模型比原模型简单而又保留了原系统的主要特性。

有适当精度的模型是大系统研究的基础。本书集中研究大系统的分析与控制问题，未涉及建模与模型简化。关于建模和模型简化，读者可参考〔3〕、〔7〕。

2. 大系统的稳定性、能控性和能观测性

稳定性、能控性和能观测性是控制系统的最基本的特性。大系统维数高结构复杂给研究这些基本特性带来了困难，大系统常常由若干子系统构成或可以分解为若干子系统。在研究大系统的稳定性时我们可以先研究它的各个子系统的稳定性，由于子系统的规模较小，可采用通常的分析系统稳定性的方法，然后再研究关联在什么样的条件下可以保证整个大系统的稳定性。

关于能控性与能观测性需要研究的问题有组合系统的能控性（能观测性），分散系统的能控性（能观测性）和结构能控性（能观测性）。组合系统的能控性（能观测性）是由大系统的各子系统的能控性（能观测性）推断这些子系统经串联、并联得到的组合系统的能控性（能观测性）。分散控制系统的能控性（能观测性）研究在分散信息结构下（每个子系统只有自己子系统的信息）的能控性与能观测性的问题。结构能控性（能观测性）从研究系统的结构入手，研究在某种固定的结构下，模型的参数变化时的能控性（能观测性）问题。在结构能控性（能观测性）的研究中引入了图论的方法。

3. 镇定和极点配置

镇定和极点配置是设计反馈控制系统的基本方法。在大系统中主要研究由若干子系统构成的组合系统的镇定和极点配置以及分散控制系统的镇定和极点配置。由于分散镇定和极点配置只需要子系统本身的信息，对这个问题的研究特别受到重视。

4. 大系统的分解与协调

在通常的控制论中，一般情况下都把对象看作一个整体，控制采用完全集中的方式。但由于前述的大系统计算和结构的复杂性，在大系统研究中广泛采用了分解-协调方法。分解-协调法是将一个大系统分解成若干个规模较小的子系统，通过协调变量协调这些子系统使整个系统得到最优解。

分解-协调的方法很多，本书着重介绍目标协调法、关联预估法和直接分解-协调法。前两种方法主要解决大系统最优控制问题的计算复杂性。直接分解协调法着重考虑了大系统的最优控制的在线实现问题。

5. 分散控制

由于大系统维数高或各子系统处于不同的地理位置，信息传递受到一定的约束。这时整个系统分成若干个控制站，每个局部控制站的控制规律只能由局部的量测输出决定。这种信息结构称为分散

信息结构，得到的控制策略称为分散控制。分散控制结构具有很多优点。首先各子系统只根据自己的信息决定自己的控制，便于对出现于子系统的干扰做出快速反映，这有利于提高控制品质。各控制站之间不需要交换信息，节省了大量传送信息的费用。分散控制在一个系统发生故障时不影响其他子系统的控制，因而增加了整个系统的可靠性。此外由于局部决策运算量也大量减少。

由于分散控制有上述多种优点，分散控制的研究受到了极大的重视。

因为信息结构和控制结构受到限制，分散控制得到的是次最优控制。

6. 分布式综合控制和管理系统

由于大系统具有维数高和结构复杂的特点，在实际工程上常采用多计算机控制方式。在工业过程控制中，各控制现场常采用微处理器实现现场的控制，由上位计算机完成更复杂的控制和管理任务。并且将所有计算机联成局部网，构成一个分布式综合控制和管理系统。由于它具有分散控制的优点，必要时各子系统之间又可以交换信息，从而可以进一步提高控制水平，它还具有很强的管理能力和极方便的人-机接口。因此分布式控制和管理系统出现以后，经过不断改进很快就成为过程控制的主流，迅速得到推广。

§ 1.3 本书的目的和主要内容

我们的目的是为自动控制类专业和系统工程专业的本科生和硕士研究生写一本教材或教学参考书，它也可供从事大系统控制的工程技术人员参考。

从60年代初至今大系统的研究已经延续了20多年，在大系统的理论与方法方面取得了很多研究成果，也出版了一批专著与教材（见参考文献）。我们的选材侧重于方法和技术方面。一方面使读者了解大系统研究的基本问题和主要结果，另一方面更侧重于与大

系统控制的在线实现有关的内容。此外还用一些篇幅介绍了一些目前正在研究的新问题，如递阶智能控制问题和分布式控制系统的信息选取问题。

全书共十章，各章内容如下：

第一章介绍大系统的基本概念、基本特征和大系统研究的主要问题。

第二章、第三章讲组合系统和分散控制系统的镇定和极点配置问题。

第四章讲组合系统的递阶控制，先介绍了非线性规划中的强对偶性定理，然后介绍组合系统分解协调的目标协调法、关联预估法和田村三级协调算法。

第五章讲分散系统的最优控制问题。由动态阶问题的主要结果引出了关于分散控制的三个方面的重要结果，即关于解的线性形式、动态规划技术的可应用性和解与状态估计的可分离性的结果。最后介绍了在实际中被广泛采用的分散控制器设计的参数最优化法。

第六章介绍目前最有希望实现在线应用的直接分解-协调法和直接分解-协调法应用于具体系统可能遇到的一系列问题。

第七章讲大系统的鲁棒控制器的设计方法。

第八章讲大系统的稳定性、能控性和能观测性检验的基本方法。讨论了大系统的Lyapunov稳定性、输入输出稳定性、组合系统的能控性与能观测性和结构能控性与能观测性等问题。

第九章介绍了一种适合于复杂系统控制的新的递阶智能控制系统及其在工业机器人控制中的应用。

第十章介绍了大系统计算机控制实现的有关问题。主要介绍了在分布式控制系统中提出的信息选取问题。

第九、十两章介绍的都是目前刚开始研究的问题，还很成熟，但具有启发性，有助于读者开阔眼界，在实际工作中进一步研究这些问题。

本书要求读者具有控制理论、计算机科学的基本知识和线性代数、微分方程及概率论等数学基础。阅读第九章时需要有模糊数学的基本知识。

参考文献

- 〔1〕 辛格, M.G., 大系统的动态递阶控制, 科学出版社, 1983
- 〔2〕 Singh, M.G., Title A., Systems: Decomposition, Optimisation and Control, Pergamon Press, 1978
- 〔3〕 詹姆希迪, J., 大系统建模与控制, 科学出版社, 1986
- 〔4〕 Tamura, H., Yoshikawa, T., Large-Scale Systems Control and Decision Making, Marcel Dekker Inc., 1990
- 〔5〕 Drouin, M., Abou-Kindi, H., Martion, M., Control of Complex Systems—Methods and Technology, Plenum Press, 1991
- 〔6〕 Singh, M., Decentralised Control, North-Holland Publishing Company, 1981
- 〔7〕 Mahmond, M. S., Singh, M. G., Large-Scale Systems Modelling, Pergamon Press, 1981
- 〔8〕 李人厚、邵福庆, 大系统的递阶与分散控制, 西安交通大学出版社, 1986
- 〔9〕 陈禹六, 大系统理论及应用, 清华大学出版社, 1988
- 〔9〕 席裕庚, 动态大系统方法导论, 国防工业出版社, 1988
- 〔10〕 达庆利、何建敏, 大系统理论和方法, 东南大学出版社, 1989
- 〔11〕 胡恒章、傅丽, 分散递阶控制, 宇航出版社, 1991

第二章 组合系统的分散镇定

本章讨论组合系统的分散镇定问题，这里说的组合系统是指由若干个互相关联的子系统联成的大规模控制系统，组合系统中每个子系统具有系统的局部输入和局部输出，比如由若干个发电站联成的供电网络，其中每个电站是一个子系统，一电站对网络供电的操作是此供电系统的局部输入，而各电站所采集的本电站运转情况的一些数据就是系统的局部输出。

对组合系统的控制就是对各子系统的控制。如果各子系统都进行独立控制，即根据本子系统所具有的信息确定本子系统内的局部输入信号，而不需要各子系统之间的信息交流，则称之为组合系统的分散控制。组合系统分散控制的结论如图2-1所示。

倘若用分散控制能使组合系统的动态满足我们要求，如具有某

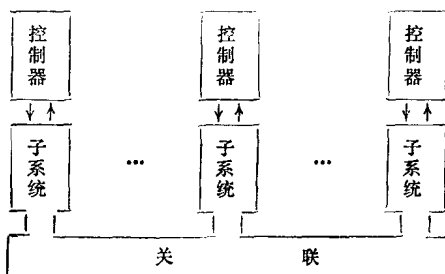


图 2-1 组合系统分散控制的结构

种稳定性、鲁棒性、或最优性等，那当然是十分理想的，因为分散控制不需要在各子系统之间传送信息，从而节省了系统的运行费

用。而且，分散控制所用的控制器相对来说比较简单，价格比较便宜。更重要的是，有的分散控制能使各子系统具有相对的自治性：它不但能控制整个大系统顺利运行，而且一旦由于某种自然的或人为的原因，各子系统之间失去关联而成为一个个孤立子系统时，它们在控制律不变的情况下，能够不出现破坏性故障而继续正常运行。

本章讨论定常线性组合系统的分散镇定问题，就是要求一个分散控制策略，它能使组合系统闭环稳定，同时也能使一旦失去关联而变成的各孤立子系统能保持闭环稳定。

§ 2.1 状态反馈分散镇定

已知定常线性组合系统的数学模型一般形式如下：

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = A_i \mathbf{x}_i(t) + B_i \mathbf{u}_i(t) + \sum_{j=1}^n A_{ij} \mathbf{x}_j(t), \quad (2.1.1)$$

$$\mathbf{y}_i(t) = C_i \mathbf{x}_i(t), \quad i=1, \dots, N \quad (2.1.2)$$

我们称系统 (C_i, A_i, B_i) ：

$$\dot{\mathbf{x}}_i = A_i \mathbf{x}_i + B_i \mathbf{u}_i, \quad (2.1.3)$$

$$\mathbf{y}_i = C_i \mathbf{x}_i, \quad i=1, \dots, N \quad (2.1.4)$$

为组合系统(2.1.1)，(2.1.2)的子系统。设第 i 子系统的状态向量 $\mathbf{x}_i \in R^{n_i}$ ，输入向量（控制向量） $\mathbf{u}_i \in R^{r_i}$ ，输出向量 $\mathbf{y}_i \in R^{p_i}$ 。 A_i ， B_i 和 C_i 是相应维数的常数矩阵。

我们称(2.1.1)中的 $\sum A_{ij} \mathbf{x}_j$ 为第 i 子系统上出现的关联项， A_{ij} 为关联矩阵。

以后如无特别声明，总假定系统 (C_i, A_i, B_i) 是能控、能观测的。

2.1.1 问题的提出

现提出组合系统(2.1.1)的状态反馈分散镇定问题如下：求分