

哈尔滨工业大学研究生教材

# 分散递阶控制

Decentralized Hierarchical Control

胡恒章 傅 丽 编著

宇航出版社

# 分散递阶控制

胡恒章 傅丽 编著

科学出版社

## 内 容 简 介

本书讨论了动态系统分散递阶控制的基本理论和方法，同时结合飞行控制、导航控制、过程控制、系统工程等方面的实际系统，说明其理论和方法的应用。在基础理论方面，首先介绍了系统稳定性、对偶原理；在确定性系统方面，介绍了分散控制及优化、分散递阶控制及优化、非线性系统的分散递阶控制及优化；在随机系统方面，介绍了分散递阶滤波、随机控制、自适应控制及对策，最后讨论了鲁棒控制和关联分析设计。

本书可供从事大系统理论及其应用方面的工程技术人员、科研工作者及大专院校的教师、研究生和本科生参考。

2R01/51-10

### 分 散 递 阶 控 制

胡恒章 傅丽 编著

责任编辑：李明观

\*

宇航出版社出版

北京和平里滨河路1号 邮政编码100013

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

北京密云华都印刷厂印刷

\*

开本：787×1092 1/32 印张：9.875 字数：229千字

1991年6月第1版第1次印刷 印数：1—1500

ISBN 7-80034-383-9/TP·023 定价：8.20元

## 前 言

分散递阶控制是近代发展起来的新的控制理论分支。在工程控制与经济管理等大系统客观需要的推动下，这一分支的理论和实践都得到了迅速发展和突破，分散递阶控制结构及方法已显示出强大的生命力。本书在引论中讲述分散递阶问题的提出和背景；在第2章中讲述基础理论、系统稳定性及对偶原理；在第3章至第6章中讲述确定性分散递阶控制问题，包括分散递阶控制及优化、非线性系统分散递阶控制及优化；在第7章至第10章中讲述随机分散递阶控制问题，包括分散递阶滤波、随机控制、自适应控制和对策；在第11、12章中讲述鲁棒控制和关联分析设计。书中含有国内外学者及作者在这方面的最新研究成果，在每章中都结合应用进行了讨论。本书读者需要具备最优控制、随机控制、自适应控制等理论基础，有关这些内容在本书中不加论述。

本书从理论联系实际出发，首先，在理论上系统地阐明分散递阶控制的理论基础，确定性分散递阶控制及优化理论、随机分散递阶滤波与控制理论，同时着重联系实际飞行控制、导航控制、过程控制、系统工程等方面的应用，因而读者对象较为广泛，无论是理论工作者、教师和学生，还是从事实际工作的工程师和从事系统工程方面的管理人员，都可以从阅读本书中得到理论分析方法方面和实际应用方面的

启发。

由于分散递阶控制的理论和实践正在迅速发展，也由于作者的水平所限，书中定有许多不完善之处，错误在所难免，恳请读者指正。

编著者

1987年9月

# 目 录

<b>第1章 引论</b> .....	( 1 )
1.1 什么是分散控制.....	( 1 )
1.2 什么是递阶控制.....	( 2 )
1.3 为什么要分散递阶控制.....	( 5 )
1.4 分散递阶控制系统的优化.....	( 6 )
参考文献.....	( 7 )
<b>第2章 系统稳定性与对偶原理</b> .....	( 8 )
2.1 李亚普诺夫(Liapunov)稳定性判据.....	( 8 )
2.2 鲁里叶(Lur'e)稳定性判据.....	( 13 )
2.3 波波夫(Popov)稳定性判据.....	( 14 )
2.4 超稳定性判据.....	( 17 )
2.5 对偶问题.....	( 20 )
2.6 对偶原理.....	( 21 )
2.7 对偶原理证明.....	( 22 )
参考文献.....	( 24 )
<b>第3章 分散控制</b> .....	( 26 )
3.1 确定型分散稳定控制.....	( 26 )
3.2 动态补偿分散稳定控制.....	( 30 )
3.3 多级控制分散稳定.....	( 33 )
3.4 具有给定指数稳定度的分散控制.....	( 38 )
3.5 时变系统局部反馈分散稳定控制.....	( 42 )
3.6 分散控制的最优化.....	( 46 )

3.7	分布参数系统控制	( 48 )
	参考文献	( 51 )
<b>第4章</b>	<b>最优分散递阶控制</b>	( 53 )
4.1	目标协调法	( 53 )
4.2	三级递阶法	( 56 )
4.3	最优递阶时延算法	( 59 )
4.4	关联预估法	( 62 )
4.5	分散控制关联预估法	( 64 )
4.6	分散闭环控制	( 66 )
4.7	离散二级递阶控制	( 68 )
4.8	河流污染控制	( 71 )
	参考文献	( 75 )
<b>第5章</b>	<b>非线性系统分散递阶控制</b>	( 76 )
5.1	非线性系统的目标协调法	( 76 )
5.2	非线性系统的紧缩协调法	( 77 )
5.3	非线性系统二级共态预估法	( 80 )
5.4	非线性系统三级算法	( 82 )
5.5	递阶模型跟踪控制	( 83 )
5.6	同步发电机激磁的递阶模型跟踪控制	( 85 )
	参考文献	( 88 )
<b>第6章</b>	<b>次优分散递阶控制</b>	( 89 )
6.1	串联系统的次优控制	( 89 )
6.2	一般结构的次优控制	( 92 )
6.3	在结构扰动下递阶控制的稳定性及性能	( 95 )
6.4	造纸机的多级递阶智能控制	( 100 )
	参考文献	( 109 )
<b>第7章</b>	<b>分散递阶滤波估计</b>	( 110 )
7.1	递阶极大验后估计	( 110 )

7.2	附加矢量递阶估计	(115)
7.3	补充分块分散滤波	(117)
7.4	滞后系统的分散滤波	(120)
7.5	串联系统的递阶滤波	(124)
7.6	离散系统分散参数估计	(128)
7.7	惯性导航系统的分散与局部卡尔曼滤波	(132)
7.8	图形匹配惯性组合导航的分层卡尔曼滤波	(141)
7.9	分布参数系统的卡尔曼滤波	(148)
	参考文献	(152)
<b>第8章</b>	<b>分散递阶随机控制</b>	<b>(153)</b>
8.1	伟森毫森(Witsenhausen)反例	(153)
8.2	动态协同决策	(156)
8.3	线性平方正态协同决策	(158)
8.4	动态协同决策的分解	(164)
8.5	一步迟后信息共享模型	(167)
8.6	迟后信息共享模型的估计与控制的分离	(169)
8.7	线性连续系统的分散控制	(172)
8.8	线性随机系统的周期协调控制	(176)
8.9	交连系统的分散结构变换	(181)
8.10	动态补偿分散控制系统	(186)
8.11	分散随机控制	(188)
	参考文献	(191)
<b>第9章</b>	<b>动态对策控制</b>	<b>(193)</b>
9.1	追逃对策控制	(195)
9.2	自适应对策控制	(198)
9.3	最小方差维纳滤波控制(MVW)及在自动导引 控制中的应用	(206)
9.4	最小方差合作对策控制	(216)



参考文献	(223)
<b>第10章 分散递阶自适应控制</b>	(225)
10.1 三重自校正飞行高度控制	(225)
10.2 分散辨识协同决策控制	(232)
10.3 关联系统的分散自适应控制	(242)
10.4 递阶自校正飞行控制	(246)
10.5 递阶协同决策自校正控制	(256)
10.6 自适应惯性导航系统	(261)
10.7 纸机系统的自适应智能控制	(268)
参考文献	(270)
<b>第11章 分散鲁棒与校正控制</b>	(271)
11.1 鲁棒伺服设计	(271)
11.2 分散鲁棒伺服	(273)
11.3 分散鲁棒伺服的序列可靠性	(275)
11.4 分散鲁棒控制的并发可靠性	(278)
11.5 多变量校正控制	(281)
11.6 分散校正控制	(284)
参考文献	(287)
<b>第12章 关联分析与设计</b>	(288)
12.1 竞争稳定性与合作稳定性	(288)
12.2 回路关联	(289)
12.3 多重时滞系统关联分析与设计	(291)
12.4 多回路关联分析设计	(295)
12.5 最小方差关联控制设计	(297)
12.6 李亚普诺夫优化关联设计	(301)
12.7 线性二次型关联控制设计	(304)
参考文献	(306)

# 第 1 章 引 论

关联动态系统分散递阶控制问题的研究已经取得了很多成果，也有不少问题尚待研究，以下将分别予以论述。在本章中将说明：什么是分散控制？什么是递阶控制？为什么它们如此普遍的存在？为什么它们比其他结构更有发展前途？它们能否优化？它们在工程和经济系统中怎样应用？以及它们和智能控制的关系。这些问题已经引起理论界和工程界的极大关注。

## 1.1 什么是分散控制

经典的控制是集中的，亦即利用一个集中控制器来控制整个系统。随着控制系统的发展，一个集中的控制器难以胜任复杂的控制任务，或是难以集中获取信息而不能得到使用。将一个统一的系统分解为若干个子系统，采用若干个子控制器实现控制，同时考虑子系统之间的相互关联，这就构成了分散控制系统。例如，一个电力网由若干个电站分散控制。又如，一个飞行器由三个角运动（俯仰、偏航和倾斜）和三个直线运动（前后、上下和左右）共六个子系统分散控制。因此，分散控制系统总是由多于一个控制器的系统构成。同样，经济系统也是有多个子系统和多个决策者控制的，例

如,一个国家有多个省、市和基层单位; 一个企业有多个科、室、车间。

典型的分散控制如图1-1所示。

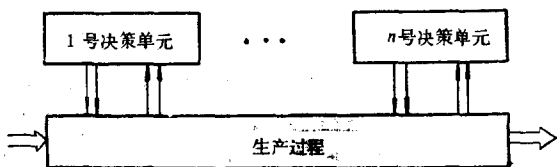


图1-1 分散控制示意图

图中, 生产过程为被控对象, 1号至 $n$ 号决策单元为分散控制器。例如, 纸张生产过程的控制。控制参数为纸张的定量(单位面积质量)、含水量, 厚度等, 并分别定义为1号、2号、3号等变量, 相应于它们的控制为1号、2号、3号等决策单元。从而构成1号、2号、3号等分散控制系统。

## 1.2 什么是递阶控制

在分散控制系统中, 各决策者需要互通信息, 如果有一协调者负责此项工作, 于是, 在第一级分散控制之上出现了第二级、第三级而形成锥形结构, 这就是递阶控制(Hierarchical Control)。工程方面, 例如, 电力网系统, 若各个电站子系统之上有一级协调控制, 则构成了递阶控制; 又如, 飞行器的六个子系统上有一级协调控制, 也构成递阶控制。管理方面例如, 国家、省、市和基层的管理系统; 又如, 工厂、车间和工段三级管理系统, 皆为递阶结构。人的大脑是中央、

而心、肺、肝、肾等为内脏子系统；耳、鼻、喉、眼等是感觉子系统；手、脚是执行子系统，因而也构成了递阶结构。这种递阶结构在控制中是最合理的和最有效的。

递阶控制的结构形式一般分为三种。即多层结构、多级结构和多重结构。

### 1.2.1 多层结构 (Multiplayer Structure)

多层结构是按系统中决策的复杂性来分级的。例如，在考虑不确定因素的复杂控制系统中，控制功能可按以下四层来实现：

(1) 直接控制层或调节层，其任务是在有扰动的情况下，力图把过程被控变量维持在预先设定值上；

(2) 优化层或监控层，其任务是按照一定的最优性能指标来规定直接控制层各控制器的设定值、要求对象的数字模型、扰动模型以及它们的参数已知；

(3) 学习层或自适应层，其任务是根据对实际系统的观测来辨识优化层中所使用的结构和参数，使模型尽量和变化的实际过程保持一致；

(4) 自组织层，其任务是按照系统控制的总目标来选择下层所采用的模型结构、控制策略等。如果参数辨识结果不令人满意，它可以修改自适应层的学习策略。图1-2表示了含上面四种功能的多层递阶结构。

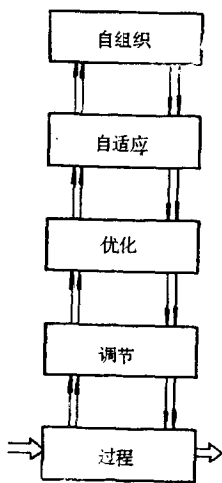


图1-2 多层递阶结构

### 1.2.2 多级结构(Multilevel Structure)

这种结构形式是在分散决策的各子系统之上加一级协调级。这样，可以减少同一级子系统之间的信息交换和决策的冲突，而由上一级来协调。如图1-3所示。复杂系统的级数较多，呈锥形结构。如图1-4所示。

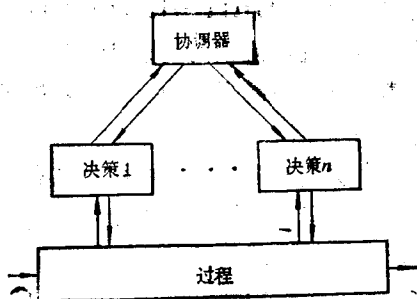


图1-3 多级结构

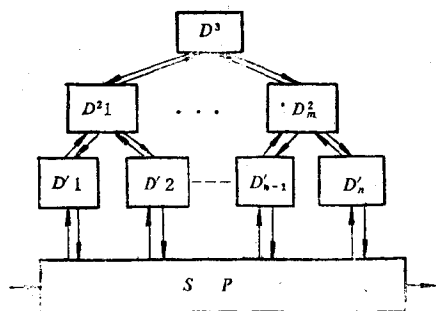


图1-4 锥形结构

### 1.2.3 多重结构(Stratified Structure)

是指利用一组模型，从不同角度对系统进行描述的多级结构，例如，对于一个复杂的自动化生产过程，可以按以下

三个层次来研究：

(1) 把系统看成是按一定物理规律变化的物理对象；

(2) 从信息处理和控制的角度，把过程看成是一个控制对象；

(3) 从经济学角度，把系统看成一个经济实体来评价它的效益和利润。

一个复杂系统的结构可以是上述递阶结构形式的组合。在不同层次上引入人工智能，则使整个系统智能化，从而形成递阶智能控制。

### 1.3 为什么要分散递阶控制

无论从工程观点还是从管理观点来看，为了提高效率必须进行分散递阶控制。理由如下：

(1) 决策者能处理的信息是有限的；计算机受计算量和计算时间、存储量的限制，对人而言受记忆能力和分析能力的限制；

(2) 并行工作就会产生分散的决策方式，工程上控制变量的增多，测量、决策就需分散控制。在经济管理中，人多了决策者就多了，当工作是并行进行时更是如此；

(3) 按照总体目标要求，为了协调分散的决策人的活动，若设置专门协调职务以构成等级递阶，如分级，分层等结构，比分散决策者之间进行联系的效率要高。

随着系统的复杂化，分散就必然会出现。反之，在分散情况下，为了克服决策过程复杂的一种结果：递阶结构，必然出现。正如国家大，完全依靠统一计划管理有困难，分级

管理、权力下放、分散递阶管理就是必然的。工程系统复杂时也是一样，集中控制已不可能了，分散递阶控制就是不可避免的。

#### 1.4 分散递阶控制系统的优化

最优化方法已经在工程中得到广泛应用。将最优化方法如何用在分散递阶系统中，这是正在研究中的课题。分散递阶系统最优化可以得到如下效果：

- (1) 具有更好的控制性能；
- (2) 降低存储量、计算量和减少计算时间；
- (3) 系统结构灵活、易于改变。系统容量可以逐步增加或减少；
- (4) 可以设置备用子系统，成本低，可靠性高。

以上优点在经典控制结构中是不具备的。而且，由于最优化在某些复杂系统中难以实现，因此，又有了次优化方法。然而，人们常常不是按最优化法或次优化法，而是按满意程度来作出选择。例如，只要指标大于给定值就满意了。这样，计算量可以减少以便于在线运算。

分散递阶优化的优越性还在于可将一系统复杂的指标进行分散、分层优化，即把复杂问题分解为若干简单问题，再作优化处理。无论是用最优化、次优化或满意程度来处理，都会使难点分散、计算量减少，从而，更好的满足实时性要求。

分散递阶优化的益处还在于，在各个级别上可实现智能化。在实时性要求较高的子系统上，要以满足实时要求为主，而将智能化的功能，如分析、判断、运筹、推理及总结等需

要花费时间的工作放在更高的系统级别上处理，使系统即能满足实时要求，又能引入智能控制来逐步提高控制系统的性能。

分散递阶系统优化能够实现的重要条件是，计算机功能的提高和普及，尤其是实现计算机联网，利用计算机的计算、存储、互通信息的能力及其接口，为复杂大系统分散递阶控制提供了实现的手段。

### 参 考 文 献

- [1] Singh, M.G., Dynamical Hierarchical Control. North-Holland. (1980)
- [2] Lasdon, L.S., Optimization Theory for Large Systems. Mac. New York. (1970)



## 第2章 系统稳定性与对偶原理

线性系统的稳定性已经有了很多判据。例如，古氏判据、劳氏判据和乃氏判据等。所得稳定性的条件是充分必要的条件。线性系统的稳定性理论已经发展得比较完善，然而对于非线性系统来说，在一般情况下，系统稳定的充分必要的条件尚待研究。1892年，李亚普诺夫 (Liapunov) 给出了非线性系统稳定的充分条件<sup>[1]</sup>。1950年后，鲁里叶 (Lur'e) 首先将这一理论用于控制系统设计<sup>[2]</sup>。1962年，波波夫 (Popov) 将这一理论发展到频域，并定义了超稳定性和波波夫不等式稳定性判据<sup>[3]</sup>。之后，兰道 (Landau) 将此理论推广到离散控制系统<sup>[4]</sup>。

分散递阶控制常遇到非线性问题，因而稳定性分析方法就成为这类系统的设计基础，而对偶原理又是这类系统分解和优化的基础，为此，将系统稳定性理论与对偶原理作为基础理论作一简介。

### 2.1 李亚普诺夫稳定性判据

在状态空间定义的非线性系统，以 $x$ 为状态变量， $f(x)$ 为 $x$ 的非线函数，其状态方程为

$$\dot{x} = f(x) \quad (2.1-1)$$