分散控制

〔英〕M.G. 辛格 著

李人厚　胡保生 译

国防工业出版社

分散控制

〔英〕 M.G.辛格 著
李人厚 胡保生 译

国防工业出版社

内容简介

本书系统地综合了分散控制的原理以及最近十几年来它在理论上和实践上的新成就。

全书共分六章。第一章论述了分散控制的基本概念；研究了递阶控制和分散化的关系。第三、第四两章着重讨论随机分散控制的理论和控制器的设计。第五、第六两章介绍了确定性系统的分散控制和分散控制器的设计技术。第二章单独介绍了实现分布式控制系统的主要工具——微处器的软件和硬件，也简单地涉及了分布式的算法。书中各章举有应用实例。

本书可供从事自动控制、大系统理论和系统工程的有关研究人员、大专院校的高年级学生、研究生和教师自学使用。也可供从事分布式计算机控制的科技人员参考。

DECENTRALISED CONTROL
MADAN G. SINGH
NORTH-HOLLAND PUBLISHING COMPANY 1981

*

分散控制
〔英〕 M. G. 辛格 著
李人厚 胡保生 译

*

国防工业出版社出版
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/32 印张12 261千字
1985年12月第一版 1985年12月第一次印刷 印数：0,001— 3,350册
统一书号：15034·2869 定价：2.45元

译 者 的 话

人类社会的不断发展和进步，越来越迫切要求人们研究和控制各种大规模系统的运动过程。有时对这类运动稍作改进就能取得巨大的经济或技术效果。这种现实使得对大系统的控制和管理成为当前重大科学研究的前沿阵地之一。

显然，当系统越大和包含事物越多时，就涉及系统本身在地理上（即空间上）的分散性（或分布性）。典型的大系统有：电力网、城市交通网、计算机网络、生态系统、大区域的经济系统等等。对这些分散化的大系统，人为地采用集中控制方式，需要复杂的远距离的信息传输和交换。这显然是比较困难的，而且在经济上也往往是不合算的。因此，就自然地产生了大系统分散控制的需要。微处理器和微计算机的不断完善和价格不断下降，从技术上保证和促进了大系统分散控制和分布式控制系统的实现和发展。

为了推广和应用分散控制的理论和方法，推动国内在分散控制领域的研究并使之为我国实现四个现代化服务，我们翻译了曼达姆·辛格（M. G. Singh）最近的著作“分散控制”。这书比较系统地综合了分散控制的原理和方法以及最近十几年来它在理论上和实践上的新成就。

在翻译时，我们发现原著在印刷上有较多的错误。凡是能找到出处的地方我们尽可能作了校正。在有较大更改的地方，我们都在改动处作了注释。符号上和字句上的小错误在改正之后就没有一一加以说明。

全书前言和第三章由胡保生同志翻译。其它各章均由李人厚同志翻译。胡保生同志也作了校正工作。由于我们水平有限，翻译中难免还有不少错误和不当之处，敬请读者给予指正和帮助。

译　者

前　　言

价廉的微处理器的出现，导致工业仪表和控制的改革。现在，有可能在工厂的不同部分利用微处理器作为分布式控制器。在这种情况下，信息的转移和微处理器的相互联结成为一个十分重要的问题。近几年来，这个问题已从不同角度进行研究。一方面，计算机科学家研究了各种计算机相连接的规程；但至少到目前为止，还很少用综合的理论来解决这个问题。另一方面，控制和系统工程师研究了多级递阶或分散化的控制结构，并用分布的计算装置来控制大系统。虽然，递阶最优化和控制领域得到了很大的重视，发表了许多文章和出版过三本书〔1970年米萨罗维奇（Mesarovic）著，1977年本书作者著，以及作者与铁特立（Titli）1978年合著〕。但是还没有把分散化控制方面的各种文献加以归纳和综合。本书就是填补这种空白的一种尝试。

关于分散控制的基本文献资料可以分为三部分。首先是对随机分散控制问题所完成的大量工作。包括从1968年威辛豪逊（Witsenhausen）描述非经典信息模式的重要文章开始，以及后来在动态队论领域中主要由何毓琦、青木（Aoki）、阿逊斯（Athans）、逊达尔（Sandell）等所做的工作。几乎是独立进行的另一方面，则主要是由戴维逊和王（Wang）、科夫曼特（Corfmat）和莫尔斯（Morse）等利用极点配置技术对确定性分散控制问题所进行的工作。还有一些工作则是解决分散控制器的设计技术。随机的设计技术

主要由阿逊斯、赵（Chong)、逊达尔和青木所开发；而哈桑（Hassan）和辛格（Singh)、杰罗密耳（Geromel）和伯纽索（Bernussou）等对确定性分散控制的设计问题曾作过某些贡献。本书企图将这些工作加以综合，为分散控制提供一个易于理解的处理方法。

本书包括六章。第一章是导论，研究递阶和分散化，并介绍了基本的分散控制问题。

第二章给出微处理器的硬件和软件概念，以及由凡利亚（Varaiya）所开发、供大系统分布计算用的一个模型。

第三章介绍非经典信息模式，并用动态队论作为例子来阐明由这种模式造成的困难。

第四章对随机分散控制问题研究时延分享模式，以及以固定结构控制器为基础的设计要求。

第五章从极点配置的观点研究确定性的分散控制问题。介绍王和戴维逊、科夫曼特和莫尔斯的主要成果。这些成果对分析分散化控制系统十分重要。

最后，第六章主要介绍确定性分散控制的设计技术。

全书应用许多例子来阐明物理概念。作者相信这样做能使本书有利于作为一本研究生用的教科书，并供研究工作者自学。同时也希望能推动在此领域中开展更多的研究工作。

M.G.辛格

曼彻斯特，1980年12月

目　录

第一章　递阶、分散和大系统

§1.1 引　言

直到最近，实际上所有控制系统是以分散方式进行设计的。因此，在一个电站中，为锅炉控制所进行的设计是与透平机、压缩机、同步机等等无关的；在设置交通信号中，每个交叉路口的信号灯变化只反应它本身入口道路的交通情况；在化工厂中，不同过程独立地进行控制。遗憾的是，这种方式有许多缺点。主要是：

（a）由于各独立受控的子系统实际上是互相关联的，所以不能保证整个系统会保持稳定。1978年在法国，以及前些时候在纽约发生的停电事故就是归因于在互相连接的电力系统中缺乏稳定性。

（b）另一缺点与最优化有关。显然，在大多数情况下，人们用整体设计方法可以做得更加好些。特别，当世界上不可再生的资源日益减少时，这就变得尤其重要。因而最优或近乎最优的运行变得极为关键。

象电站、大型化学和其它工业系统、环境和生态系统、交通运输系统等等的整体设计是极其困难的。其主要原因是这些系统十分复杂且阶次很高。标准的多变量设计技术在频域分析中超过5个输入和5个输出，或者在时域方法中有15～20个左右的状态，就会碰到严重的计算困难。为解决这些计算上的问题，最近十年来已出现了新的设计原理和相应

的数学工具〔1-5〕。新原理的基础是利用**分解**。我们知道，系统实际上常常包含以某种方式互相连接的可识别的子系统。比如，电站自然地分成蒸气（锅炉）、发电（透平交流发电机）、电网等等，交通信号网络分成交叉点或交叉点的群等等。标准的多变量控制技术可以应用到已分解的子系统中去。然而，整个系统包含着互为连接的子系统，因此，设计原理必须考虑到这种相互作用的存在。

在递阶方法中〔1-2〕，整个系统分成为独立平行处理的子系统；而用一个协调器来考虑这种相互作用。这是通过较低级和协调级间重复的信息交换来实现的。图 1.1，从结构上表示了递阶的基本概念。

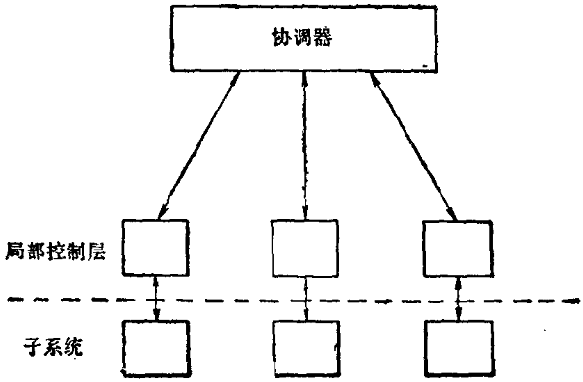

图 1.1

这种递阶结构在日常生活中，特别在组织机构中是很常见的。

从使用的信息观点来看，递阶结构与集中结构十分相似。至少从原则上来讲，协调器可以拥有局部控制所有的全部信

息。这种递阶结构具有所谓"经典信息模式"。在第三章中我们将详细讨论经典和非经典信息模式。我们注意到，如果这里没有一个协调级，那么这组局部控制器将只有局部信息，这标志了"非经典信息模式"的特征。

本书论述的分散控制器，它具有非经典信息模式。

对于分散控制系统，一方面控制器必须考虑与其它子系统的相互作用；另一方面又只能利用局部信息，所以经典的最优概念不再有意义了。下面我们讨论用于分散控制的另一种最优准则。

§1.2 分散控制的最优化准则〔7〕

分散决策或控制问题是以存在许多决策者为特征的，他们的决策确定了系统状态的变化。如果一个系统的状态由 x 来标记，第 i 个决策者（或控制器）的决策变量为 u_i（$i=1, 2, \cdots N$），我们假定状态的变化是由下式来定义

$$\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, \ u_1\cdots u_N) \qquad (1.2.1)$$

$$t_0\leqslant t\leqslant t_f$$

式中 $\boldsymbol{x}\in \boldsymbol{R}^n, \ \boldsymbol{u}_i\in \boldsymbol{R}^{m_i}$

方程（1.2.1）的主要特征是没有一个控制器可以按它自己的决策来控制整个系统。每一个控制器都有一个企图达到的目标，而不同控制器的目标可以是不同的。我们假定第 i 个控制器的目标 J_i 具有形式为

$$J_i=\int_{t_0}^{t_f} g_i(\boldsymbol{x}, \ u_1\cdots\cdots u_N)dt \qquad (1.2.2)$$

函数 $\boldsymbol{f}$ 和 g_i，$i=1\cdots N$ 要满足某些平滑条件使得方程（1.2.1）的解存在。为使问题阐述完全起见，我们要对方程（1.2.1）设定一个初始和（或）终端条件，且详细说明终点时间

t_f 如何确定。

在本书的其它各章中，我们将对这种表述作某些扩充，使方程（1.2.1）中包括干扰。这使我们能计及存在于系统中的不确定性。有些时候，在这种情况下，方程（1.2.2）中的积分将由求和来代替。当 $g_1=g_2\cdots=g_N$ 时，就有队决策问题〔8〕。如果所有决策者具有关于系统的相同信息，则队决策问题就简化为经典的最优控制问题。如果只有二个决策者且 $g_1=-g_2$，那么就有所谓追逐-规避问题。其理由是在追逐-规避对策中，经常有

$$g_1\equiv -g_2\equiv 1$$

这种类型的问题也称之为二人零和微分对策，因为

$$g_1+g_2=0$$

为了理解非零和对策的概念，让我们考虑一个有二个竞手参加的决策问题。这二竞手用绳子拉一块大石头。竞手可以任意选择拉石头的方向（2π 弧度）。如果一个竞手（比如 P_1）想把石头尽可能向东移动，而另一个（P_2）想尽可能向西拉，那么这情况就是零和。然而，如果 P_2 要想把石头尽可能往南移动，那么这种情况为非零和。因为目标并非完全相反。在三个或多于三个决策者的情况下，他们不可能完全相反，所以多人决策理论和二人非零和决策是密切相关的。在多人决策情况下，存在着结盟的可能性。

现在让我们考虑分散控制的各种最优化概念。我们主要考虑一个非零和对策情况。各个控制器（或决策者）可合作或不可合作。这分别导致佩尔托（Pareto）最优化概念和纳什（Nash）最优化概念。我们注意到在零和对策中不存在合作的理由，对于这种对策，这些最优化概念是一致的。

在合作解答中，该解答称之为佩尔托（意大利铁路工程

师）解答，并不存一个对所有决策者都比较好的解答。在上面我们已考虑过的 P_1 向东拉，P_2 向南拉的拉绳例子中，两个决策者共同拉向东南，就是一个佩尔托解。

在非合作情况下，一个决策者不可能单方面改善他的结果。我们假定这种解答，也叫做纳什（美国经济学家）解，被给定为 u_1^*，$\cdots u_N^*$，那么纳什解的定义为

对 $i=1$，$\cdots N$，存在 u_i 使

$$J_i(u_1^*,\ \cdots u_N^*)\leqslant J_i(u_1^*\cdots u_{i-1}^*,\ u_i,\ u_{i+1}^*,\ \cdots u_N^*) \qquad (1.2.3)$$

因此，如果所有其它决策者固定在他们的纳什解，那么P_i不可能比本身决策为 u_i^* 做得更好。

举例：

为说明这些概念，举一简单例子。让我们考虑二人决策问题，他们各具有以下目标

$$J_1=(1-u_1)^2+u_2^2$$
$$J_2=(1-u_2)^2+u_1^2$$

那么纳什解由解下列方程得到

$$\partial J/\partial u_1=0,\quad \partial J/\partial u_2=0$$

由此得出 $$u_1^*=u_2^*=1$$

因为价值函数对称，显然纳什解满足 $u_1=u_2$。为简化计算，让我们将 $u=u_1=u_2$ 代入 J_1，如果对 u 求最小，则 $u=u_1=u_2=1/2$，这显然不同于纳什解。事实上，这是一个佩尔托解。

在斯塔科尔堡（stackelberg）解中，决策者之间存在一个等级。在二个决策者情况下，有一个领导者和一个随从者。领导者必须在事先宣布他的决定，随从者可利用此信息去作出自己的决定。在多人决策者情况下，就可以看到或者是多级（比如 P_1 是领导，他首先宣传自己的决策，该决策为 P_2