

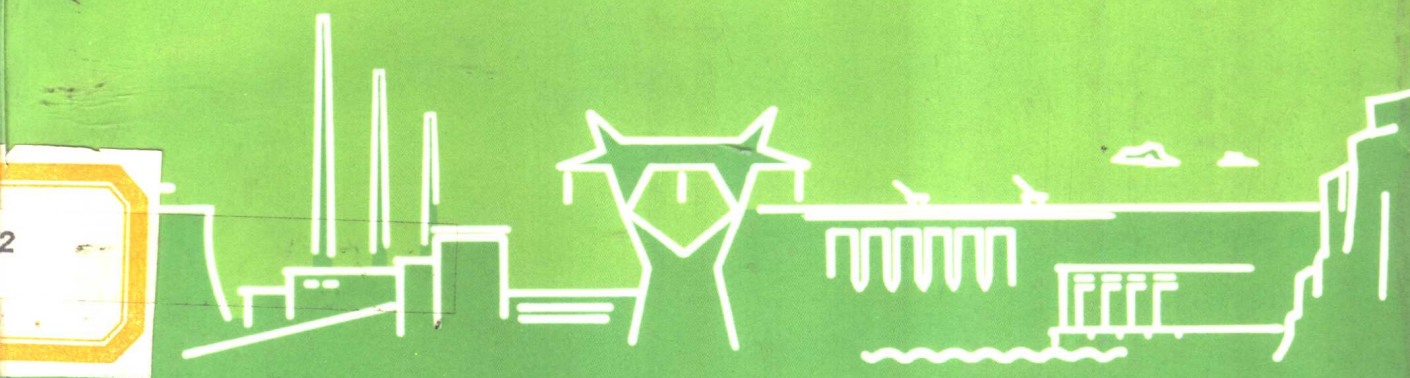


普通高等学校水电工程类专业教学指导委员会推荐使用教材

高等学校教材

水电系统 规划、管理决策方法论

大连理工大学 王本德 主编



中国电力出版社

991047

普通高等学校水电工程类专业教学指导委员会推荐使用教材

高等学校教材

水电系统 规划、管理决策方法论

大连理工大学 王本德 主编

中国电力出版社

rd

内 容 提 要

本书较系统地论述了水电系统规划、管理决策的基本理论与方法。全书共分三篇十章。第一、二章阐述大系统递阶分析与多目标多模型递阶分析方法；第三章介绍大系统分析法在水电系统规划和实时调度中的应用；第四章论述大系统模糊优选决策理论与方法；第五、六章介绍模糊优选决策理论与方法在水电系统规划、计划与实时调度方案选择中的应用；第七、八章重点阐述决策支持系统的基本概念与结构设计方法；第九、十章主要介绍决策支持系统和智能决策支持系统以及在水电系统调度中的应用设计方法。每章后作一小结，便于读者抓住要点。论述方法的章节，都举有简例，便于读者掌握基本理论与方法。

本书是硕士研究生的选修教材，水电工程类高年级本科生可选用部分章节，亦可供从事水电系统规划、管理、运行的技术人员及高校有关专业师生和科研院所研究人员阅读与参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

水电系统规划、管理决策方法论/王本德主编. -北京: 中国电力出版社, 1997

高等学校教材

ISBN 7-80125-324-8

I. 水… II. 王… III. ①水电系统规划-方法-高等学校教材 ②水电工程-电力系统-管理-方法-高等学校教材 IV. TV7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 04581 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

三河市水利局印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1997 年 8 月第一版 1997 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.75 印张 308 千字

印数 0001—1000 册 定价 13.50 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前 言

水电系统既具有水资源系统的特点，又具有电力系统的特点，它与水文气象、自然地理、生态环境及社会经济等系统具有密切关系，是一个结构复杂、规模庞大、功能综合的大系统。水电系统优化问题，在应用传统优化技术求解时，遇到了“维数灾”、定性与对立目标及模糊信息处理、决策人参与和偏好处理等困难，并且实践证明，处理上述问题的任何一点技术改进，都会带来较大的社会与经济效益，因此，从技术和经济角度，寻求水电系统优化新理论与方法是十分必要的。

随着系统工程学、信息及现代控制论和计算机技术的发展，随着模糊集合论的创建，大系统优化理论逐渐形成一个专门科研领域，其应用范围已扩展到水电系统，其中的多目标多模型递阶分析和多目标多层次多阶段模糊优选方法，为水电系统规划、管理决策方法论奠定了基础。

为提高水电工程类专业本科、研究生教学质量，深入研究与完善水电系统规划、管理决策方法论，据专业教学指导委员会第四轮教材建设计划，编写这本选修教材。学时数为 51 学时，它的先修课是系统分析、模糊集合论、计算机应用。

本教材共分三篇十章。第一、二章主要论述大系统多目标多模型递阶分析法；第三章重点介绍上述方法在水电系统补偿调节计算、参数选择、容量规划和水、火电站联合调度中的应用，这三章由黄强博士编写；第四章主要论述多阶段多层次多目标模糊优选决策理论与方法；第五、六章详细介绍模糊优选决策理论与方法在水电系统开发次序、环评、参数选择、编制调度计划及选择实时调度方案中的应用，这三章由周惠成博士编写；第七、八章主要阐述专家决策支持系统的基本概念、组织结构设计方法；第九、十章重点叙述水电系统调度的专家决策支持系统与智能决策支持系统结构设计与应用，这四章由解建仓博士编写。全书由王本德教授统稿，陈惠源教授审稿。

本教材特点之一是，首次将多目标多模型递阶分析与多阶段多层次多目标模糊优选方法融为一体，并作为水电大系统规划、管理决策方法论的基础论述。特点之二是，将智能决策支持系统基本概念及应用设计作为一篇统一编排，尽管它是一个辅助决策的人机交互系统，不属理论方法范畴，但实践证明，理论方法的应用或模型的实施都离不开它，因此统编是必要的。第三个特点是，每章后编写一个小结，便于读者抓住要点。另外，由于大系统优化问题求解过程计算繁杂，受篇幅限制，所以应用部分的举例只能介绍基本思路、成果分析。

由于参编者较年轻，况且大系统优化理论还在发展之中，故教材必然存在不足甚至错误，敬请读者批评指正。

本教材编写中，承蒙李惕先教授和陈守煜教授精心指导，并且得到中电联教培部、西

CAE 08/05

安理工大学、大连理工大学、中国电力出版社及水电工程类专业教学指导委员会水能利用教学组全体委员的大力支持，特表示衷心的感谢。

编 者

1996年10月

目 录

前 言

第一篇 大系统优化理论及应用

第一章 大系统递阶分析方法	1
第一节 引论	1
第二节 大系统分解协调原理	4
第三节 开环递阶控制的基本方法	6
第四节 闭环递阶控制的基本方法	13
第五节 目标及模型协调法的应用	18
第六节 本章小结	28
第二章 大系统多目标多模型递阶分析方法	29
第一节 引论	29
第二节 多目标多模型系统递阶分析方法	32
第三节 大系统多目标递阶分析的分解—聚合方法	39
第四节 大系统聚合—分解方法	43
第五节 本章小结	45
第三章 大系统分析方法在水电系统中的应用	46
第一节 在水电系统补偿调节计算中的应用	46
第二节 在水电站水库参数选择中的应用	51
第三节 在水电系统容量扩展规划中的应用	64
第四节 在梯级水电站水库群长期优化调度中的应用	69
第五节 在水、火电站联合实时调度中的应用	77
第六节 本章小结	81
参考文献 (I)	82

第二篇 模糊优选决策理论及应用

第四章 模糊优选决策理论与方法	84
第一节 引言	84
第二节 模糊优选中的基本概念	85
第三节 多目标模糊优选满意决策基本模型	88
第四节 多层次多目标模糊优选满意决策模型	90
第五节 多阶段多目标模糊优选满意决策模型	91
第六节 有模糊约束的多阶段多目标模糊优选决策模型	95
第七节 本章小结	101

第五章 模糊优选决策理论在水电系统规划中的应用	102
第一节 引言	102
第二节 在水电站开发次序与环境评价中的应用	102
第三节 在水电系统容量规划中的应用	109
第四节 在水电系统防洪参数选择中的应用	111
第五节 在水电站水库兴利参数选择中的应用	115
第六节 本章小结	126
第六章 模糊优选决策理论在水电系统运行管理中的应用	127
第一节 引言	127
第二节 在编制电力调度计划中的应用	127
第三节 在选择实时电力调度方案中的应用	132
第四节 在选择实时防洪控制水位中的应用	136
第五节 本章小结	143
参考文献 (Ⅱ)	143

第三篇 水电系统规划管理智能决策支持系统

第七章 决策支持系统概论	145
第一节 决策支持系统 (DSS)	145
第二节 决策支持系统基础	146
第三节 水电系统 DSS 发展动态	157
第四节 本章小结	161
第八章 决策支持系统的设计	162
第一节 DSS 的组织设计工作	162
第二节 DSS 的开发工作	163
第三节 DSS 的系统结构	167
第四节 DSS 的对话管理系统	170
第五节 数据库管理系统 DBMS	171
第六节 模型库管理系统 MBMS	174
第七节 DSS 的生成器及工具	176
第八节 两种 DSS 的系统总体设计方法	177
第九节 本章小结	179
第九章 决策支持系统在水电系统中的应用	180
第一节 DSS 应用前提	180
第二节 水电系统 DSS 的总体功能及结构设计	181
第三节 水库调度 DSS 数据库系统设计	184
第四节 DSS 中生成器的设计与实现简介	187
第五节 水电系统 DSS 的模型和方法库模式	190
第六节 水电系统 DSS 的人机交互及初步应用	191
第七节 本章小结	192
第十章 智能决策支持系统的设计及应用	193

第一节	智能决策支持系统 IDSS 特征及结构	193
第二节	知识及专家系统简介	194
第三节	人工神经网络及应用	200
第四节	水电系统智能决策支持系统 IDSS 软件包讨论	208
第五节	本章小结	210
参考文献 (Ⅲ)		210

第一篇 大系统优化理论及应用

第一章 大系统递阶分析方法

第一节 引 论

大系统优化理论从 70 年代开始逐渐形成了一专门科学研究领域，它综合了现代控制、系统工程和多目标决策等方面的理论和技术，目的是解决大规模复杂系统的控制和优化问题。研究内容涉及到大系统的建模和辨识、大系统模型简化、大系统结构型式和信息处理、大系统的稳定性和可靠性分析，以及大系统优化递阶分析方法和控制等。应用范围已从复杂的工业技术系统扩展到社会、政治经济系统、工程系统和生态环境系统等，解决诸如人口预测、区域或全球经济发展、资源开发、空间技术、水资源开发利用和污染控制等领域。

因为水电系统也是一个结构复杂、规模庞大、功能综合的大系统，因此大系统优化理论很自然被水电科学工作者引用于解决水电系统的规划、管理和调度优化问题，并进一步发展具有自己特色的理论与方法。

大系统优化理论十分丰富，受篇幅限制，本篇仅能重点介绍有关大系统的基本概念和分析方法，以及在水电系统中的应用。

大系统理论与系统工程学和现代控制论密切相关，其基本的优化方法来自系统工程，许多概念源于现代控制论。所以本章将在简介现代控制论和大系统概念与特点的基础上，重点阐述大系统基本递阶型式及其分解协调思想；详细介绍大系统协调优化关联平衡和关联预测法等。

一、现代控制论简介

控制论是本世纪 40 年代发展起来的一门新兴学科。控制论的奠基人诺伯特·维纳把控制论定义为“关于在动物和机器中控制和通信的科学”。控制论是从宏观方面将动物、人、通信和控制机器三者的控制功能加以类比，从而概括出一切控制对象都必须遵循的观点、法则和定律。它是跨越具体学科的界限把控制的基本功能归结为信息的接收、变换、存储、处理、反馈和输出，从而由各类具体控制技术中抽象出来的理论方法。控制论研究的对象是系统，随着信息和系统概念的拓宽，在本世纪 60 年代出现了现代控制论，它从时间域和状态空间的概念出发，研究利用信息进行调节和控制系统。现代控制论根据应用领域不同，逐步形成工程控制论、生物控制论、经济控制论和社会控制论四大分支。

现代控制论是研究一般系统中控制和信息过程共同规律的科学，是一门涉及领域广泛的综合性很强的科学。它所包含的基本概念有：信息、系统、控制、反馈、输入、输出、状态等等。

1. 信息

信息这个概念极为普遍，但是迄今为止，这个概念还没有一个公认的定义。

贝尔电话研究所的申农博士把通信系统中的“消息”称之为信息，并解决了这种被称之为狭义信息的度量问题。维纳从控制论角度出发，提出了含义更为广泛的信息概念：“信息是我们适应外部世界并且使这种适应为外部世界所感到的过程中，同外部世界进行交换的内容的名称”。该定义说明信息是指人、动物或机器等控制系统与外界相互联系的一种形式，为广义信息。

广义信息包含了人类感官所能感知的一切有意义的东西，它是事物存在的方式或运动状态，以及对事物的直接或间接的表述。任何一种控制过程都贯穿着信息的获取、加工、传输、存储和利用。水电系统常应用的众多的气象、水文、泥沙等方面的实测资料就是一种描述信息的具体形式。

目前，关于广义信息的研究处于初始阶段，仍在探索发展中。

2. 系统

系统是一个非常基本的概念，广义地说，宇宙间的万事万物，人们研究的所有对象，都可以说是系统。一般系统论的创始人贝塔朗菲把系统定义为相互作用要素的综合体或者“是处于一定的相互联系中的与环境发生关系的各组成部分的总体”。

控制论并不是一般地研究一切系统，而只研究存在控制的系统。凡具有能接收、存储和处理信息并用它来进行调节和控制的任何性质的系统，均称之为控制论系统，简称系统。

3. 控制

控制是控制论中的最重要的概念。对一个系统的控制，就是驱动此系统使之有效地达到预定的目的。控制的目的有两种：一是保持系统原有状态，使之不发生偏离；二是引导系统的状态达到某种预期的新状态。若控制系统的目的是一个，称为单目标控制；如果是多个，则称为多目标控制。

控制又分开环控制和闭环控制。所谓开环控制，是指可预先算出系统达到的目标，外加控制于系统，且系统的输出量对系统的控制作用没有影响，如图 1-1 所示。

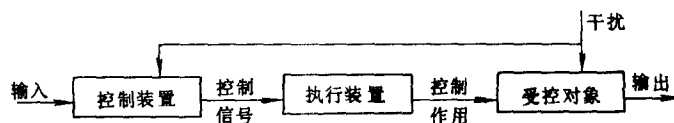


图 1-1 开环控制系统

然而，在许多系统中，系统的实际输出与期望输出存在差值，说明输出量对控制作用有影响，此影响可用其差值来调整 and 操纵，这就是所谓的反馈控制。存在反馈控制系统形成了闭环，故称为闭环控制，见图 1-2 所示。

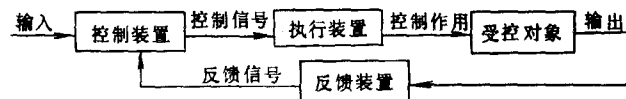


图 1-2 闭环控制系统

采用开环系统比较适合,但是,由于开环控制是按照事先算好的策略进行控制,一旦扰动或给定值发生变化时,系统的输出量将偏离希望的值,甚至造成很大的误差。因此,采用闭环系统可以在很大程度上纠正偏差,但是在时间上有一定滞后,这种滞后有时会产生振荡或不令人满意的现象。与闭环控制中的反馈概念相对应,在开环控制中有所谓的“前馈”概念,这是指根据输入信息来计算反应并作出校正,有时它可根据某一模型来预测。在实际的控制中,往往采用开环和闭环相结合的方法或采用前馈和反馈相结合的复合控制方法,将能获得比较好的控制效果。

二、大系统的概念及特点

大系统是指大规模复杂系统。迄今还没有一个严格公认的定义。钱学森、宋健认为:“所有能够在大范围内采集数据,处理数据,分析情况,从而进行指挥管理和控制的系统,人们现在统称为大系统”。1977年默罕莫德(Mahmoud)认为,若系统维数非常大,以致应用常规的建模、分析、控制、设计和计算方法,都不能通过合理的计算程序得到有效的结果时,这样的系统就是大系统。大系统与一般系统相比,具有下列一些特点。

1. 规模庞大

凡大系统须用数目很大的参数来描述,因而其数学模型维数高,一般采用整体分析计算进行求解,将出现“维数灾”(计算机内存、机时等超量)。

2. 结构复杂

系统结构的复杂性表现在各子系统、各变量等之间具有相互关联的复杂结构,使系统呈现出多目标、多输入、多输出、多干扰、多参数、多变量、非线性等许多特性。

3. 功能综合

通常,大系统的多个目标,常常相互冲突。为了实现多样化的目标,大系统必须具有综合性功能;为了评价系统功能,也必须用多目标准则和技术进行优化和决策。

4. 不确定性

大系统的特性参数的不确定性表现为随机性、模糊性等,所以大系统一般都是随机系统、模糊系统或灰色系统等。同时系统的参数变量随时间推移而出现复杂的动态变化。

由于大系统存在上述特性,用传统的方法难于进行控制或优化。按照信息交换的方式和关联处理的方式,大系统控制可分成分散控制、分布式控制和递阶控制三种形式。分散控制是将大系统分成若干个子系统,每个子系统有独立的控制目标,其输入或输出均是对各子系统的,由系统的分散控制来实现对整个系统的控制,因而需要多次的反馈才能获得系统整体控制效果;分布控制是将整个系统的控制目标事先按一定方式分配给各子系统,子系统间可有有限的信息交换,通过对各子系统逐次控制及反馈,实现系统反馈;递阶控制是将大系统按一定的优先和从属关系,分解成多级子系统,整个系统形成金字塔结构,同级的各子系统可以平行控制并对下级的子系统施加作用,同时又要受到上级的干预,子系统可通过上级互相交换信息,以分解、控制、协调的方式实现系统控制。在这三种控制形式中,递阶控制是最为常见的典型形式,例如:能源、电力、水资源、水电、工业、农业、环境系统,以及社会经济系统等均可用递阶形式来描述,因此,本章将重点论述这种形式的分解、控制、协调方法。

第二节 大系统分解协调原理

大系统优化问题最初尝试是丹兹格 (Dantzig) 和沃尔夫 (Wolfe) (1960) 在处理具有特殊结构的大型线性规划问题时开始的, 并从理论上研究了“分解”这个概念。其后米萨罗维克 (Mesarovic) 等 (1970) 对解耦方法进行了积极、有效的研究, 并把这种方法命名为“多级”或“递阶”方法。大系统递阶方法首先在社会系统 [梅尼 (Mayne), 1976] 和水资源系统 [海梅斯 (Haimes), 1977] 得到应用。目前在各种类型的大系统优化问题研究中均取得了丰硕成果, 而且正处在蓬勃的发展和应用中。

大系统最优化基本方法是分解协调, 所谓分解是将大系统分成相对独立的若干个子系统, 形成递阶形式 (如前述), 以便应用现有的优化方法实现对各子系统的局部优化; 协调是指根据大系统总目标, 使各子系统相互协调起来, 以获得系统的全局最优。

一、大系统基本递阶形式

在大系统递阶控制中, 由于被分解的各子系统的地位、功能、相互联系方式和信息交换方式不同, 因而采用的递阶形式也不同。一般大系统递阶形式有多级、多重、多层和多段四种递阶形式。其中, 多级、多段递阶形式较为常用。

1. 多级递阶形式 (Multilevel Hierarchical Type)

这是几种递阶形式中最普通的一种。大系统被分解 (划分) 为多级子系统 (或称决策单元), 各级子系统按一定的递阶 (上下级) 关联排列, 形成金字塔形状。同一级的各子系统或决策单元相互独立地工作, 但下级决策单元受上一级的控制, 同时又对下一级各决策单元施加影响。尽管各决策单元是相对独立的, 但同一级决策单元可能会有冲突的决策目标, 这就需要上一级来协调。这种递阶形式根据级次和目标多少还分成单级单目标、单级多目标和多级多目标等几类形式。



图 1-3 单级单目标递阶形式

(1) 单级单目标递阶形式 (如图 1-3 所示)。这种系统只有一个控制目标。所有决策变量的选择都为了实现这一目标, 且由一个决策单元所决定。这种形式对比较复杂的系统是较难适用的。

(2) 单级多目标递阶形式 (如图 1-4 所示)。这种系统包括多个决策单元, 它们处在同一级内, 可互相独立地平行工作, 但每个决策单元各有各的控制目标, 需用多目标决策技术来解决。

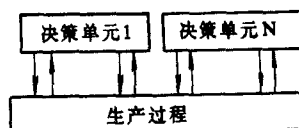


图 1-4 单级多目标递阶形式

(3) 多级多目标递阶形式 (如图 1-5 所示)。如前所述, 不同级次的决策单元只有上下级才有信息交换, 同级之间不交换信息。多目标一般是有冲突的, 需通过上级协调来解决, 协调的最后结果也就是全局优化的满意解。

2. 多层、多重递阶形式 (Multiplayer Multistratified Hierarchical Type)

多层递阶形式是根据协调决策的复杂性, 按任务的性质把系统沿纵向分解成若干个子决策层。多重递阶形式是从建模方便来考虑的, 按系统变量

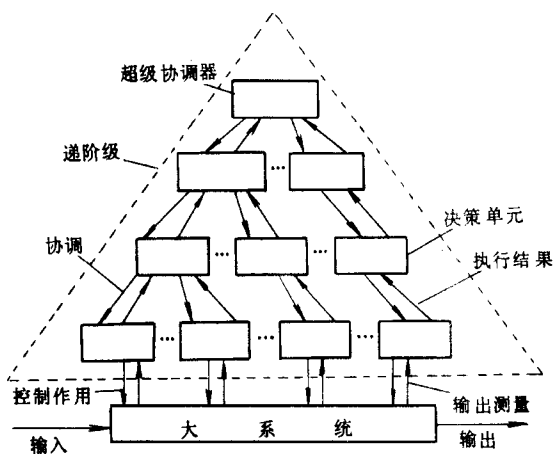


图 1-5 多级多目标递阶形式

的属性和规律把系统分解为若干重。多层、多重递阶形式都有相应的术语、概念和原理。由于这两种递阶形式没有形成成熟的递阶分析方法，并在水电系统中较少采用。

3. 多段递阶形式 (Multiechelon Hierarchical Type)

受控系统或过程按时序分解为若干时段，每一时段作为一个子系统或决策单元，再按各时段之间的关联关系，由上级协调级进行协调控制，如图 1-6 表示多段递阶形式。

这种递阶形式的特点是分段控制级与协调级之间有纵向信息联系，又通过协调级形成横向信息联系，使前段终端边界条件与后段初始边界条件衔接，以完成全过程的控制任务。

上述的多级、多层和多段递阶形式，依实际系统的性质和特点可组合。例如，在多段递阶形式中，每段还可有多级或多层递阶形式。各种递阶形式相互不排斥，可同时处于一个大系统中。

二、大系统协调原理

协调是大系统控制中常用的基本概念和寻优的基本手段。为了说明协调概念，举如图 1-7 所示的二级递阶形式。上层的协调器控制着下层的两个决策单元，它们有各自的控制目标和模型。协调器的任务是通过对于下层决策的干预来保证它们分别找到能使整个系统目标的最优解和满意解。所以协调器要不断地和下层的决策单元交换信息，一方面发出干预信号 c ，一方面接收从下级送来的有关各决策单元优化出的策略和获得的性能指标值 f 。干预信号也就是协调作用，产生干预信号的原则就是协调原理。

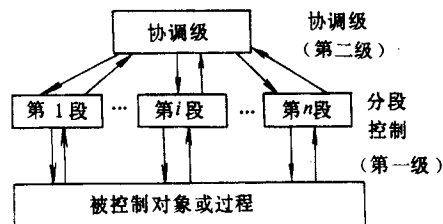


图 1-6 多段递阶形式

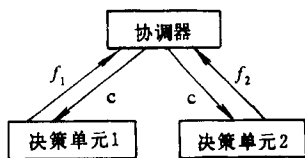


图 1-7 基本的二级结构

大系统协调原理应理解选取什么样的协调变量对各子系统或决策子单元进行协调控制，以加速协调过程，保证协调算法的收敛性，减少计算工作量。大系统优化可采用许多不同的协调算法来进行协调控制，但大多数算法都基于两种基本原理。

1. 关联预测原理 (Interaction Predication)

该原理是选取关联输入和输出作为协调变量，协调器通过预测协调变量达到协调控制的目的。具体协调过程是：下层各决策单元按协调器预测的关联变量求解各自的决策问题，然后把局部的优化性能指标值送给协调器，协调器再修正关联预测值，再送入下层决策单

元,直到总体目标达到最优(单目标)或满意(多目标)为止。基于关联预测原理的协调方法是一种可行方法,因为所有中间结果都是可行解,可直接施于实际系统,关联约束条件总是满足的。显然适合于在线控制问题。但协调器对关联变量的任意假定有时会使下面决策问题变成超定而无法求解。此时,可尽量减少关联变量的数目,或者放松对关联约束的要求,例如不要求关联变量准确地满足约束,而通过引入罚函数使其尽量接近满足,这就是所谓的罚函数协调法,当罚系数不是很大时,就有可能丧失中间各决策单元解的可行性。

2. 关联平衡原理(Interaction Balance)

该原理是下层的各决策单元在求解自己的优化问题时,不考虑关联约束,而把关联变量当作独立寻优变量来处理,从数学上看好象关联被切断一样。而协调器则是通过干预信号(协调信号)来修正各决策单元的优化目标,以保证最后关联约束得以满足,并且这时目标函数中修正项的数值也趋于零,也就获得了原目标函数的最优解。显然这是一种非可行方法,所有迭代的中间结果都不能施加于实际系统,而只有最终结果才能加到实际过程上。

关联变量常常也称为耦合变量,对耦合约束条件进行分解协调,可称为模型协调(Model Coordination),由于它是基于关联预测原理,故又称可行法(Feasible Method)。用耦合关系对目标函数进行协调,可称为目标协调(Goal Coordination),目标协调基于关联平衡原理,故又称非可行法(Nonfeasible Method)。

基于大系统分解协调原理寻优的步骤一般是:①建立研究对象真实系统的数学模型;②按照模型的性质、特点和便于求解的原则,选取适宜的递阶形式,通过分解,把大系统问题变换为某种递阶关系的子系统;③分别对各子系统的模型寻求最优解;④通过各级之间的协调关系寻求整个大系统的最优解。从求解程序而言,分解是大系统算法的递阶形式设计,协调则是大系统全局最优解的保证。

第三节 开环递阶控制的基本方法

大系统优化理论中的开环递阶控制

指无反馈的一类控制过程,根据数学模型及大系统递阶形式,采用分解协调原理找出最优控制策略(优化解),并直接施加于实际系统。这类控制问题或大系统优化问题的基本协调方法有关联预测法和关联平衡法。下面结合单目标大系统介绍这两种方法。

一、问题的一般描述

假定所研究的复杂大系统已经被划分成 N 个子系统,取其中第 i 个子系统,来阐明其变量间的关系,同时可用图 1-8 所示。对于第 i 个子系统,它的输出向量为 y_i ,控制向量 c_i ,关联输入向量 u_i 及外界扰动向量或模型参数向量 s_i ,则目标函数一般为

$$\min f_i(c_i, u_i, s_i) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1-1)$$

式中 f_i 可以是线性或非线性函数;各向量分别具有维数 R_{y_i} 、 R_{c_i} 、 R_{u_i} 、 R_{s_i} 。为了达到期望的目标值,各变量应满足一定的约束条件。首先输出向量与其它变量的关系可表示为

$$y_i = T_i(c_i, u_i, s_i) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1-2)$$

式中: T_i 表示某一特定的 n_i 维向量函数关系,一般都是非线性的。子系统之间的关联关系

(耦合约束关系) 为

$$u_i = \sum_{j=1}^N H_{ij} y_j \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1-3)$$

式中: H_{ij} 是 $R_{ui} \times R_{y_j}$ 维的布尔型矩阵, 其元素由 0 或 1 组成, 反映了从第 j 个子系统的输出到第 i 个子系统输入的关联。式 (1-3) 表示的是线性耦合关系, 故该系统称线性耦合系统。

此外, 第 i 个子系统中的变量往往会受到一定的约束, 这些约束条件在数学上可用一组等式或不等式表示为

$$g_{ij}(c_i, u_i, y_i) \leq 0$$

$$i = 1, \dots, N; \quad j = 1, \dots, J_i \quad (1-4)$$

式中: g_{ij} 是一组线性或非线性函数, 其变元可以包括 c_i , u_i , y_i , 也可仅含其中的一个或二个。

要解决以上问题所遇到的困难是, 实际上, 我们并不可能准确地知道各系统的特性, 而只能近似地用数学模型来描述。另外对于扰动 s 作为时间的函数, 也很难准确地估计, 只要变化不十分频繁, 都可认为它在整个控制周期内取平均常量, 即 s 对系统的影响是固定的, 因而可从式 (1-2) 中略去, 则

$$y_i = T_i(c_i, u_i) \quad (1-5)$$

第 i 子系统的数学模型概化为

$$\begin{aligned} & \min f_i(c_i, u_i, s_i) \\ \text{s. t. } & \begin{cases} y_i = T_i(c_i, u_i), u_i = \sum_{j=1}^N H_{ij} y_j \\ g_{ij}(c_i, u_i, y_i) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, J_i \end{cases} \end{aligned} \quad (1-6)$$

整个系统写成集合向量的形式有

$$\begin{aligned} \min F &= \sum_{i=1}^N f_i(c_i, u_i, s_i) = F(C, U, Y) \\ \text{s. t. } & Y = T(C, U), U = HY, G(C, U, Y) \leq 0 \end{aligned} \quad (1-7)$$

式中

$$\begin{aligned} C &= [C_1^T, C_2^T, \dots, C_N^T]^T, Y = [y_1^T, y_2^T, \dots, y_N^T]^T, \\ U &= [u_1^T, u_2^T, \dots, u_N^T]^T, F = [f_1^T, f_2^T, \dots, f_N^T]^T, \\ H &= \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{1N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{N1} & H_{N2} & \dots & H_{NN} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

求解式 (1-7) 可得到开环的最优解, 它可离线地求出。但由于实际系统的输出值及目标值等与模型计算的并不相等, 因此就不能保证真实系统运行能达到最优状态, 甚至连约束条件有时也不一定能够满足。于是, 又提出了用模型和反馈信息来决定真实系统次优控制方

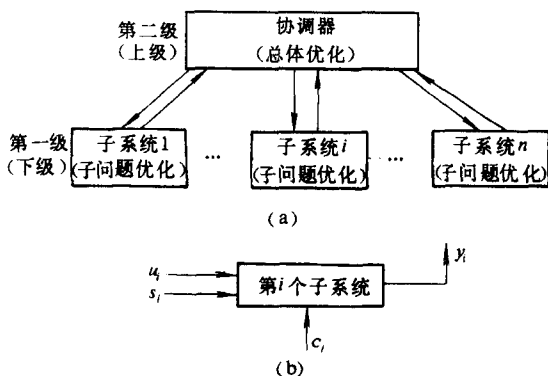


图 1-8 大系统递阶形式

(a) 大系统递阶形式; (b) 第 i

个子系统的变量

法，这就是所谓的在线闭环递阶控制。

二、关联预测法

关联预测法又称模型协调法，也称可行法。其基本思路是用指定或预估子系统模型关联输出变量 y_i ($i=1, 2, \dots, N$) 的办法将各子系统断耦，各子系统互不相联，形成独立的系统，可各自寻优。被指定的模型输出变量称为协调变量。

关联预测法的协调思想，可以用迭代法解方程进行类比。例如，为了求解 $x^2 - x - 2 = 0$ ，可把方程改写为 $x^2 = x + 2$ ，在选择迭代初值 $x_0 = 0$ (初值预估) 后，可解出 $x_1 = 1.414$ ，然后以 x_1 作为新的预估值代入，可算得 $x_2 = 1.55$ ， $\dots$ ，直至迭代到 $x_n = 2$ 时，可算出 $x_{n+1} = 2$ ，表明预估已完全正确，这时就得到方程的一个精确解。在迭代过程中的 x_k 虽然不是原方程的精确解，但总可以作为它的一个近似解。同样，在用关联预测法求解大系统优化问题时，通过断耦、预测、求解子问题和协调这样的“迭代”过程，其中间结果至少也可以作为原问题的一个可行的近似解。当然，无论是迭代解方程或协调都涉及到收敛性问题，只有在算法收敛的条件下导出的解才是真正可行的。

为了保证关联预测求出的解是整个系统的最优解，需要一个协调器，它的任务就是预估协调变量，寻求一组最优的模型关联输出向量 y_i^* ($i=1, 2, \dots, N$)，使得在这组向量下各子系统求得最优控制向量，同时也是整个系统的最优控制向量，即能使整个系统的目标函数值 F 达到极小或极大。

对原问题式(1-7)，取关联输出变量 y_i 为协调变量时，预估 y_i 则 u_i 由式(1-3)确定为

$$u_i = \sum_{j=1}^N H_{ij} y_j = H_i y \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1-8)$$

$$H_i = [H_{i1}, \dots, H_{iN}] \quad (1-9)$$

在原问题中，把 u_i 用 y_i 代替，则可去掉耦合约束式 (1-3)，原问题可分解为 N 个子系统，其中第 i 个子系统优化模型为

$$\begin{aligned} & \min f_i(c_i, H_i y, y_i) \\ \text{s. t. } & \begin{cases} y_i = T_i(c_i, H_y) \\ g_{ij}(c_i, H_y, y_i) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, J \end{cases} \end{aligned} \quad (1-10)$$

显然，式 (1-10) 表示的子系统优化问题是控制变量 c_i 和协调变量 y_i 的函数。由于 y_i 通过上级协调器预测，故各子系统优化问题可采用常规优化方法求解，求得最优的 c_i^* 和 f_i^* 值。然后把 f_i^* 送给上级协调器，协调器的任务是找到最优的 y_i^* ，使得

$$F = \sum_{i=1}^N f_i(c_i^*, H_i y^*, y_i^*) = \min_{y \in Y} \sum_{i=1}^N f_i(c_i, H_i y, y_i) \quad (1-11)$$

此时， c_i^* ， u_i^* ， y_i^* ($i=1, 2, \dots, N$) 就是整个系统的最优解。

整个问题的求解是通过逐步校正协调变量并重复求解各个子系统优化问题这样一个迭代过程来实现的。协调器按照所选定的某种预估寻优程序进行搜索，每改变一次协调变量的设定值，各子系统就进行一次优化计算，并把 f_i^* 值告诉协调器，以便为下一步的判断和搜索提供依据，这个过程一直到求解最优的总体目标值为止。上述分解协调求解过程用二级递阶结构表示，见图 1-9。

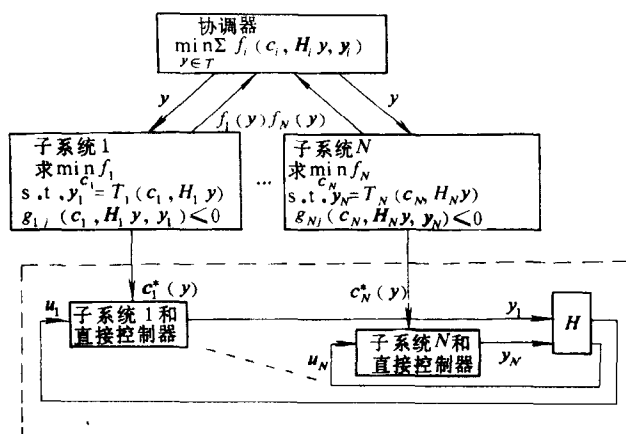


图 1-9 开环模型协调法的二级结构和信息交换

【例 1-1】有二个互相关联的子系统如图 1-10 所示，它们的模型方程、控制性能指标（目标函数）及约束集合分别是：

模型方程 $y_{11} = c_{11} - c_{12} + 2u_{11}$

$y_{21} = c_{21} - c_{22} + u_{21}$

$y_{22} = 2c_{22} - c_{23} - u_{21}$

性能指标 $f_1 = (y_{11} - 1)^2 + c_{11}^2 + c_{12}^2$

$f_2 = 2(y_{21} - 2)^2 + (y_{22} - 3)^2 + c_{21}^2 + c_{22}^2 + c_{23}^2$

约束集合 $u_{11} = y_{21}, u_{21} = y_{11}$ (关联约束)

$0.8 - c_{12} - 0.6u_{11} \geq 0$

$c_{11}, c_{12}, c_{21}, c_{22}, c_{23} \leq 1$

$y_{11}, y_{21}, y_{22} \geq 0$

用关联预测法求最优控制输入 c_{11} 、 c_{12} 、 c_{21} 、 c_{22} 、 c_{23} ，使目标函数值 $f_1 + f_2$ 最小。

解：由图 1-10 看出，关联输出变量只有 y_{11} 和 y_{21} 二个，故选这二个变量为协调变量。这样，子系统 1 的优化问题是

$$\min f_1 = (y_{11} - 1)^2 + c_{11}^2 + c_{12}^2$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} c_{11} - c_{12} + 2y_{21} = y_{11} \\ 0.8 - c_{12} - 0.6y_{21} \geq 0 \\ c_{11}, c_{12} \leq 1 \end{cases}$$

这里 $y_{11} \geq 0$ 、 $y_{21} \geq 0$ 都是由协调器指定的常量，且 u_{11} 由（关联约束条件） y_{21} 代替，故可用非线性规划的方法求得最优控制 c_{11}^* 、 c_{12}^* ，以及相应的最优性能指标 $f_1^*(y_{11}, y_{21})$ 。

子系统 2 的优化问题是

$$\min f_2 = 2(y_{21} - 2)^2 + 2(c_{22} - c_{23} - y_{11} - 3)^2 + c_{21}^2 + c_{22}^2 + c_{23}^2$$

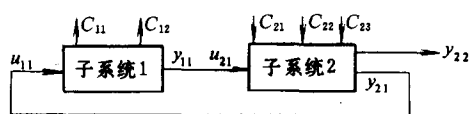


图 1-10 二个相互关联的子系统