

肖新平 邓旅成 查金茂 编著

# 灰色系统分析理论及其应用

大连海事大学出版社

HUISE XITONG FENXI LILUN JIQI YINGYONG

# 灰色系统分析理论及其应用

肖新平 邓旅成 查金茂 编著

大连海事大学出版社

## 灰色系统分析理论及其应用

肖新平 邓旅成 查金茂 编著

责任编辑:徐祖兴 封面设计:金桃

大连海事大学出版社出版

(大连市凌水桥 邮政编码 116026 电话 4684394)

大连海事大学印刷厂印刷

大连海事大学出版社发行

1997年10月第1版

1997年10月第1次印刷

开本:850×1168 1/32

印张:12.25

字数:318千

印数:1~500册

定价:20.00元

ISBN 7-5632-1118-7/O·67

## 内 容 提 要

灰色系统分析是灰色系统理论的重要组成部分,近年来不断出现新的进展。《灰色系统分析理论及其应用》一书介绍了灰色系统分析的灰关联分析理论、灰决策分析理论及实际应用等,并对灰色系统理论的其它内容也作了简要介绍,其中灰拓扑向量空间、灰区间关联度、灰矩阵关联度、灰数的概念及其四则运算的导出、灰关联理论评价、灰色区间聚类、灰色层次聚类、灰色对偶规划、灰色优化模型等新思路、新方法均为首次提出。

本书既可用作高等学校理、工、农、医、天文、地理、生物及经济、管理各专业大学生和研究生教材,又可供政府决策部门和科研机构的有关人员参阅。

## 前 言

灰色系统理论是 1982 年由我国学者邓聚龙教授创立的。短短十几年中,它不仅在理论上得到迅速发展,而且在农业、工业、能源、交通、石油、地质、气象、水文、生态、环境、医学、军事、经济、社会等众多领域得到广泛的应用,取得了一系列成果,同时也得到了国际学术界的关注和承认。据不完全统计,灰色系统理论已被应用到国内外 150 多个行业和部门中,应用该理论完成重大科研课题 160 多项,国内 142 项灰色系统理论及应用成果获国家和省(部)级奖励。国际、国内 201 种学术期刊发表灰色系统论文,特别在国际英文杂志和国际学术会议上发表的文章就达 800 多篇,并有 500 多篇(次)被国际四大检索系统检索和摘录。目前,英国已创办了灰色系统杂志(The Journal of Grey system),并公开出版了 9 卷 36 期;德国已成立了灰色系统公司,专门搜集、翻译灰色系统文献,进行咨询服务。这些充分表明,灰色系统理论观点新颖、应用广泛、前途广阔。

灰色系统分析是灰色系统理论的重要组成部分。它为系统分析与决策提供了新思路、新途径和新方法,并且具有计算简单、可操作性强的特点,是目前应用最广、成果最多的灰色系统方法之一。自 1990 年起,我们就开始学习和研究灰色系统理论,几年的时间里,在武汉交通科技大学、湖北省煤炭厅和湖北省劳动厅的大力资助和协作下,我们将灰色系统分析方法应用到煤矿安全管理上,取得了系列的研究成果;随后又在环境科学、交通工程等领域取得应用成果。近年来,我们又开始从事灰色系统分析的理论基础和方法本身的研究:在数学基础方面,我们将灰行列式看作一种映射的结果,建立了灰拓扑向量空间和有限灰数的序关系等概念及其有关性质;在分析方法方面,我们提出了区间关联分析、矩阵关联分析、聚类关联分析、多层

次关联评估、灵敏度分析等新方法,并将灰色系统方法与经典的优化理论相结合,建立了几个灰色优化模型。1997年,肖新平还在武汉交通科技大学96级博士生中开设了“灰色系统理论”选修课。本书正是我们数年来从事灰色系统分析研究、应用和教学工作的总结。

本书侧重于介绍这一学科分支的新理论、新思路和新发展。既遵循理论的系统性,又注重实用性和可读性。为此,我们根据自己的研究成果和近年来出现的其它新成果,特别分类精选了灰色系统方法的若干新的典型的应用实例,而且本书中所有的例题均为应用实例。因此,本书特别适宜用作经济、管理及理、工、农、医、天文、地理、生物各专业大学生和研究生教材和自学参考书,也可供广大科技工作者和决策人员参阅。

本书为集体编著,第四章主要由桂预风编著,第五章主要由刘富贵编著,唐伟敏参加了第五章第二节的编著。他们还参与了其它某些内容的编写工作。在本书的写作和出版过程中,自始至终都得到了各方领导和同仁的大力支持和协助。其中,灰色系统理论的创始人邓聚龙教授、中国系统科学研究会副会长黎德扬教授均仔细审阅了本书的原稿,并提出了宝贵的修改意见;此外,对我们的工作给与帮助和支持的还有:华中师范大学的毛经中教授,湖北省劳动厅李桂薪同志,湖北省煤炭厅黄定荣高级工程师,武汉交通科技大学的孙国正教授、谢世忠研究员、陈绪文副教授及我们的家人等。在此,我们特向所有的支持者表示衷心感谢!本书在编写过程中,还参考使用了许多著作和文献,在此也特向这些著作、文献的作者致谢。

由于我们的学术水平有限,加上时间仓促,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

1997年5月18日于武汉

## 序 一

本书收集、综合、阐述了灰色系统理论近几年在概念、理论、方法、体系、应用等方面的新内容、新成果。在灰色系统分析方面,本书对其理论基础、学术背景以及相关学科作了概览与对比;对灰色系统的基本原理、观念、特点、哲学内涵……作了精辟的阐述。在灰关联分析方面,本书对其理论、方法、应用作了全面的介绍。其中不少内容是作者的创见,是有份量的应用,是领域的开拓。在灰色系统理论应用新进展部分,本书结合有意义、有价值、有实效的例子,既研究了方法,又阐述了理论根基;既作了具体的应用,又作了学科的延伸。

尽管由于篇幅限制,本书对灰色系统的数学基础:灰朦胧集,没有介绍,只注意到了“用一个隶属度函数定义模糊集”,用“两个隶属度函数定义确定度更大的不确定集”的问题。但是读者如能将灰朦胧集与这种定义的不确定集作一对比,将不难发现灰色系统理论奠基于灰朦胧集的要旨。

总之,本书文字流畅,取材丰富、新颖;着重实际;不乏理论见解;不乏新见解;不乏有价值的实例,是近年来具有特色的“灰色系统理论与应用”专著。

邓聚龙

1997.9.13 于武汉

## 序 二

数学常常被人们误以为是自然科学,其实它既不是自然科学,也更不是自然科学的分支。它不研究我们外部世界的实体和现象以及它们之间的关系,而是关于对象世界的空间形式和数量关系的科学,它所具有的高度的抽象性、逻辑的严密性和应用的广泛性,是任何具体自然科学不可比拟的。正是这一点上,它和哲学、逻辑学相近相似。古希腊的关于“不懂数学的人”和“不懂哲学的人”是同义语的看法,至今还是对的。因为它所研究的形和数量是一切事物都具有的,是人类认识对象不可缺少的部分,数学便成为科学技术必不可少的工具和支撑。任何科学,如果不采用数学的表达形式和方式,就很难说达到了完善的程度。所以,数学是科学的内核之一,是教育,特别是高等教育的重要基础内容。

现代数学、自然科学处于革命的时代,发展速度的快、领域的拓展、学科分支的增长和抽象程度的提高,都是以往任何时代不可企及的。就其理论和思维方式上的革命性进展而言,表现为以下特征:从绝对走向相对;从单义性走向多义性;从精确走向模糊;从因果走向偶然;从确定走向不确定;从可逆性走向不可逆性;从分析方法走向系统综合方法;从定域走向场论;从时空分离走向时空统一。这诸多的特征,无一不与数学有关。就数学而言,数学的令人叹服的精确性,也受到了冲击,美国加利福尼亚大学控制论专家 L.A. 查德(L.A. Zaden)60年代发展起来的模糊数学就是一例。实际上,我们从外界获得的信息总是有限的,用自然语言所作的表达往往是模糊的,这类信息虽然能给我们提供识别对象的相当标准,却不存在明确的界限,难以在度量上准确把握。模糊数学从精确性扩展到模糊性,



用模糊集合论及其方法来刻画模糊现象,作出数学描述。这较经典数学方法更接近客观的情形,表达更为精确化,虽然它的理论和方法基本上还是经典数学,模糊集合论也是以经典集合论为基础的,在严格意义上,它还是经典数学的一个分支。但是,它毕竟把数学拓展到刻画人的世界中的大量存在的模糊现象的识别和认知,反映了人的认识活动中主体的矛盾性——精确和模糊的统一。又例如,分析方法向系统方法的走向,也深刻体现在数学发展中。1937年加拿大的澳裔生物学家和哲学家贝达朗非(Ludwing Von Bertalaffy, 1901—1971)首次提出“一般系统论”的概念,1945年发表《一般系统论》,系统科学便正式创立了。由于系统科学的核心,是同型性问题,它与数学有着天然的联系,从一个新的视角上揭开了世界的同一性和统一性。60年来发展异常迅速,现在已发展成一组学科群,包括控制论、信息论、一般系统论、耗散结构理论、协同学、超循环理论和系统动力学等,深刻影响到科学、数学和哲学,从根本上改变了人们的世界图景和思维方式。系统科学本质上是数学和逻辑的科学,数学为系统科学提供工具,同时数学系统理论也蓬勃发展起来,不断寻求解决不同系统的数学方法。

本书所讨论的灰色理论问题,就在一定程度上表现了现代数学、自然科学的这些新现象。灰色系统理论是我国邓聚龙教授于1982年提出的一门新学科。十多年来,在理论上有新的进展,在实践应用上也有较大的推广。灰色系统理论是系统科学的一个分支,也是数学系统理论的一部分,是我国对系统科学的新贡献。事物都是系统,我们认识事物,也就是辨认系统。我们面对的事物、系统,对不同的主体来说,可能是黑箱,可能是白箱,也可能是灰箱。控制论的创始人之一W.R.艾什比(W.R. Ashby)说:“所有事物实质上都是黑箱,我们从小到大,一辈子都在跟黑箱打交道。”我们认识对象就是获取对象的信息,由全然不知,到部分知道,再到了全部明白的过程。相对我们认识主体也可以说,对象是由黑箱转化为灰箱,再有灰箱转化为白箱的过程。所谓灰色系统就是,部分信息已知,部分信息未知

或者尚不确定的系统。这类系统在我们科学和生活实践中是大量的、普遍的,因此灰色理论提出后,国内外引起了广泛的关注和兴趣,并在实践中得到应用取得较好的成果,显示出生命力。

本书的作者们,是这一理论的热情研究者和应用者,他们着力于灰色系统分析的研究,利用灰集的扩张原理导出了灰数的概念和灰数的四则运算法则,并用分明集合套来表示灰集的结构,还建立了灰拓扑等,这些都丰富了灰色理论的数学基础。在分析方法提出了区间关联分析、矩阵关联分析、聚类关联分析等,并综合其它的系统应用于交通和煤矿的生产过程之中,作出了可喜的成绩。我从参加他们的一些活动中,体验到他们在本书中凝结的心血和付出的劳动,感受到他们探索新领域的勇气。科学是探索、是过程。新的学科就象人生的孩提时代一样,不免有含着手指头的幼稚画面,难免某些在成年人看来不周到。我相信,这是一个有着光明前景的学科,一项极有科学意义的事业,只要坚持下去,便会成熟和完善起来。出版这本书就是证明和证据。虽然数学和我有很深的情结,曾经也作过数学哲学的工作,但是,现代数学的神速发展,使我的数学知识趋近于零,除了大量的黑箱外,几乎都是“灰色”的世界。现在要为一本灰色系统数学专著作序,实在是一件十分困难的事。冒昧地说了上面的话,请专家指正,读者评说。

黎德扬

1997年6月20日于谷雨书屋

---

黎德扬教授为中国系统科学研究会副会长

## 目 录

第一章 灰色系统分析概论	1
§ 1.1 灰色系统分析的基本内容	1
§ 1.2 灰色系统分析理论的基本特点与基本原理	10
§ 1.3 灰色系统分析理论的哲学思考	13
第二章 灰色关联分析理论	18
§ 2.1 灰色关联分析概述	18
§ 2.2 点关联分析	22
§ 2.3 区间关联分析与矩阵关联分析	45
§ 2.4 与统计相关分析的比较	62
§ 2.5 关联度理论的发展及其评价	80
第三章 灰色决策分析理论	100
§ 3.1 决策分析概述	100
§ 3.2 统计与聚类决策	105
§ 3.3 多目标局势决策	125
§ 3.4 灰色综合评估	135
§ 3.5 灰色线性规划	144
第四章 灰色系统分析的相关理论	160
§ 4.1 灰色微分方程模型	160
§ 4.2 灰色预测	180
§ 4.3 关于灰色预测模型的进一步讨论	188
第五章 灰色系统方法的实际应用	197
§ 5.1 灰色关联分析应用的新进展	197
§ 5.2 在煤矿安全生产上的应用	203
§ 5.3 在环境科学中的应用	232

§ 5.4	在交通科技中的应用 .....	248
§ 5.5	在地矿、医学等方面的应用 .....	267
第六章	灰色系统分析相关的数学理论 .....	278
§ 6.1	分明集及其特征函数 .....	278
§ 6.2	代数运算与布尔代数 .....	289
§ 6.3	灰集及其运算 .....	299
§ 6.4	灰集的分解定理、表现定理与扩张原理 .....	309
§ 6.5	灰数四则运算 .....	320
§ 6.6	灰行列式 .....	332
§ 6.7	灰矩阵 .....	337
§ 6.8	灰代数方程 .....	345
§ 6.9	有界灰数的序关系与灰数不等式 .....	350
§ 6.10	灰拓扑空间与灰拓扑向量空间 .....	355
参考文献	.....	372

# 第一章 灰色系统分析概论

## § 1.1 灰色系统分析的基本内容

### 一、系统、信息与控制

#### 1. 系统

客观世界中的任何事物都是由物质、能量和信息组成的,它们决定了事物的性质。物质的新陈代谢和能量的相互转换都必须依靠信息才能进行。信息不是物质,也不是能量,但是它不能脱离物质与能量而独立存在。任何事物总是在不断地发展变化的,事物彼此之间既互相联系又互相制约。我们要认识某一客观事物的本质,就必须把握它的整体,这就是系统论的观点。那么,什么是系统呢?

钱学森曾经引用恩格斯的一句话:“一个伟大的基本思想即认为世界不是一成不变的事物的集合体,而是过程的集合体。”并指出“集合体”就是系统,“过程”就是系统中各个组成部分的相互作用和整体的发展变化。因此,钱学森提出:“把极其复杂的研究对象称为系统,即由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成具有特定功能的有机整体,而且这个系统本身又是它们从属的更大系统的组成部分。”而贝达朗非则将系统定义为:“系统是处于一定相互联系中的与环境发生关系的各组成成份的总体。”一般认为,所谓系统,就是一个包含若干相互关联、相互制约的元素所组成的具有某种特定功能的整体。

系统的这一概念包含以下几个方面的涵义:(1)作为一个系统,组成它的各个元素都是具有某种特性的,它们组成的整体是有机的,且具有某种特定功能的,而不能是一个简单的拼合;(2)系统的每一个元素的性质或行为的优劣都将影响到整个系统的性质和行为;(3)

系统中任何元素都不能独立地影响到整体,并且一个元素的性质或行为要受到其它元素的影响;(4)从整体中不能分离出单个的独立元素,即一个系统不能分解出独立的子系统,否则系统将丧失原有的性质与功能。

通过对系统概念的理解,可以看出一个系统应具有如下四方面的性质:

(1)整体性:系统至少应由两个或两个以上的不同元素按照特定的功能组成有机的整体,系统不是它的各元素的简单集合体。一个系统,可能组成它的各元素并不尽善尽美,但是可以组合成一个具有良好功能的整体。反之,即使各个元素的性质都十分良好,而组合成的整体也有可能不具有良好的功能,这种系统不是一个好的系统。

(2)相关性:系统内部的各元素之间是相互关联、相互作用,从而组成为一个有机的整体。任何元素都不能从整体中分割出去,否则将损坏系统的总体功能,甚至破坏整个系统。

(3)目的性:每一个系统都是为实现一定的目的而存在,没有特定的目的,系统就没有存在的必要,也就没有必要去研究它,要达到既定的目的,就要研究这个系统,实现最优的控制与管理。

(4)环境适应性:任何系统都存在于一定的客观环境中,环境对系统有着必然的影响,系统也必须适应外界环境的变化,排除环境的干扰,利用环境提供的有利因素,从而正常地发挥系统本身的特定功能。

人们认识系统、理解系统的概念,目的在于从系统的观点出发,设计和建立有目的的人工系统,通过系统的组织建立和科学管理,以达到人们所希望达到的目的。对系统这种组建或管理的过程,也就是通常所说的系统工程的过程。

## 2. 信息

信息是系统的要素、结构与功能的统一体现。没有信息特征,系统就不能被描述和表达,那么,什么是信息呢?

信息作为一个科学概念,最早在本世纪 20 年代,出现于通信领

域。到现在为止,据有人统计,关于信息的有影响的定义已达 39 种之多。例如,维纳在 1950 年认为:“信息这个名称的内容就是我们对外界进行调节并使我们的调节为外界所了解时而与外界交换来的东西。”W.R 艾什比在 1956 年提出“‘变导度’这一概念,即信息论中所讲‘信息’这一概念。”我们认为,信息是两个系统,即信源与信宿之间联系的内容。信宿通过信道,接收到信源发出的信息,从而在某种程度上消除了它的不定性。

信源是产生源信息的客观系统,信源可以是人、机器、自然界的物体等。信源发出信息时,应以某种符号(文字、图象等)或某种信号(语言、电磁波信号等)表现出来,表示信息的符号或信号称之为消息,消息的形式是具体的、多样的。消息是信息的载体,它载着信息。

信道是信息传递的通道,是传输信息的媒体。信道是构成信息流通系统的重要组成部分。

信宿是信息的接收者,它可以是人,也可以是机器,或其它客体。信宿通过信道所获得的信息通常称为宿信息。

噪音是在信道环节上形成的影响信号如实传递的各种干扰因素的总和。任何通讯活动中,噪音都是不可避免的,正是由于噪音的存在,致使信息在信道中传递时,常常产生失真的现象。

信息的传递框图如下(图 1.1):

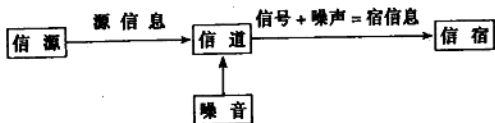


图 1.1 信息传递框图

### 3. 控制

控制是指对系统的控制。关于控制的定义,目前比较认同列尔涅尔所给出的:“为了‘改善’某个或某些对象的功能或发展,需要获得并使用信息,以这种信息为基础而选出的,加于该对象上的作用,

就称为控制。”这个定义表明,控制作为一个科学概念,是一种作用,更严格地说,是一种特定的作用,控制这种作用,至少需要有作用者,即施控主体,被作用者,即受控客体,以及将作用由作用者传递到被作用者的传递者这三个必要的元素,由它们组成控制系统。所谓控制就是施控主体,通过传递者对受控客体所施加的一种能动作用,这种作用使受控客体能根据施控主体所设定的目标而动作,并将动作结果反馈给施控主体,最终达到所设定的目标。控制系统总是在某种环境限制下工作的。

一般控制系统的框图可表示如下(图 1.2):

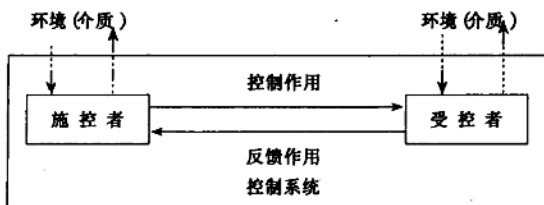


图 1.2 控制系统框图

控制论发展到现在,大致可分为三个阶段:

第一阶段,从 20~30 年代到 50 年代末,称为经典控制论阶段,或者说是控制理论的产生阶段。

经典控制论又称为自动调节原理,它是自动控制、通讯工程、计算技术、神经生理学与病理学等以数学为工具和联系的纽带相结合的产物。它是在第二次世界大战时期,为了提高武器发射命中率的需要而发展起来,主要以研究线性、定常、单输入—单输出以及一些简单的系统的控制,使用的主要分析方法为频率法和根轨迹法。系统对应的数学模型的基本形式是传递函数,在连续的时间系统,其数学模型是微分方程,在离散的时间系统,则是差分方程。对于集中参数系统,采用常微分方程;对于分布参数系统,采用偏微分方程;对于非线性系统,则采用相平面法和描述函数法。

经典控制论的主要贡献在于,它建立了系统、信息、调节、控制、



反馈以及系统的稳定性等控制论的基本概念和系统分析方法,由于经典控制论常带有试凑的特征,因而无法设计与解决高精度的最优控制系统、自适应控制系统以及其它的复杂大系统的问题。

第二阶段,从50年代末到70年代初为现代控制论阶段。

控制论的正式诞生是以维纳于1948年正式出版《控制论——关于在动物或机器中控制和通讯的科学》为标志。这本书是控制论的奠基性著作。1961年,维纳的《控制论》出了第二版,他写了序言并补充了两章,主要涉及学习、自繁殖机器和自组织系统,反映了当时控制论研究的新进展。

在50年代末与60年代初,由于导弹、航天、航海中的制导、导航、控制与空间技术的发展,以及生产过程的日趋复杂,需要研究大量非线性系统和时变系统。它们的参数要受到某种特殊限制,要求控制过程实现多参数调节,还有一些系统要考虑各种随机因素和随机干扰,需要实现工程技术中的多变量控制、最优控制和自适应控制。这些要求使自动控制理论经历了一场变革。随着计算机技术的迅速发展,状态空间概念被引进到自动控制领域,它用空间状态来描述系统的行为,将系统的数学模型取作状态方程,主要的分析方法是状态空间分析法。常用状态用非线性微分方程来描述非线性系统,使所设计的控制系统便于在电子计算机上实现,从而使现代控制论的应用范围大为扩充。现代控制论主要包括确定性最优控制、最佳估计、随机控制、系统识别与自适应控制等。有时要用概率论与数理统计方法来求得系统中的某些随机参数,从而建立相应的数学模型,也包含用解析法(包括变分法、庞特里雅金极大值原理和动态规划)、数值分析法(包括最速下速法、康托罗维奇法及牛顿梯度法)等来处理具有不等式约束的时变系统和非线性系统的最优控制问题;用高斯输入线性系统的分离定理来处理随机系统的控制问题;用卡尔曼滤波来处理最佳估计;用卡尔曼滤波与数值法来处理系统识别和自适应控制问题。

现代控制理论的发展是控制工程中的一个新阶段,是一个跃变,