

# 灰色系统

社会·经济

邓聚龙 著

国防工业出版社

# 灰色系统

(社会·经济)

邓聚龙 著

国防工业出版社

## 内 容 简 介

灰色系统是指既含有已知信息又含有未知的或非确知信息的系统。

灰色系统理论是我国学者邓聚龙教授1982年在国际上首先提出来的,为未来学的研究提供了新的基本理论和基本方法。它是控制论的观点和方法延伸到社会、经济的产物,也是自动控制科学与运筹学的数学方法相结合的结果。灰色系统理论在农业方面的应用已收到显著效益。

本书对灰色系统的概念、理论和方法作了较全面的论述。书中包括灰色系统的基本概念、建模、关联分析、预测、决策、系统分析、控制及应用实例等八章。

本书可供社会、经济、管理、工程技术、农业、医学、生物、生态、环境、天文、地质、气象、水利、应用数学、未来学、系统工程、控制工程等方面从事预测、决策、区划、规划、系统分析控制的科技工作者、大专院校有关专业师生、管理规划决策人员参考。

## 灰 色 系 统

(社会·经济)

邓聚龙 著

责任编辑 唐允昌

\*

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

\*

850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 插页2 印张8<sup>8</sup>/<sub>4</sub> 228千字

1985年2月第一版 1985年2月第一次印刷 印数:00,001—11,250册

统一书号:15034·2851 定价:2.10元

## 前 言

灰色系统是控制论的观点和方法延伸到社会、经济系统的产物，是自动控制科学与运筹学的数学方法相结合的初步尝试。其内容包括建模、预测、决策、控制等。在预测、决策、建模方面，更多的是体现系统由抽象对象转化为“同构”实体这种系统由灰变白的特点，而不是局限于灰数、灰元的处理。灰色系统在这方面的初步成果及内容，已在农业及其他方面作了初步应用，比如

- 1982年湖南双峰的区划
- 镗床控制系统动态分析
- 陕西农科院棉花害虫的生物防治灰色模型
- 河南人民胜利渠的灌溉决策
- 我国粮食长期预测模型
- 河南的灰色气象预报等。

在山西省农科院及山西省区划委员会的主持下，开办了第一个“灰色系统”培训班。目前，山西农科院资源所等一些单位正开展灰色系统理论在农业区划、作物布局、系统分析等方面的研究工作。并希望今后在经济计划的制订、自然资源的开发，未来情况的预测方面起更大的作用。

系统各环节明显地存在灰白参数混杂的情况，主要（或更多的）出现在工程技术系统中。

鉴于目前的研究任务，及配合我国经济形势的发展，本书主要侧重灰色系统在社会、经济方面的应用，希望在社会科学与自然科学的沟通、用数学模型与计算机技术研究社会、经济方面起它应有的一点作用。

本书共八章，即灰色系统概言、灰色系统建模、关联度、灰色系统预测、灰色系统决策、灰色系统分析、灰色系统控制、灰色系统应用实例。其中建模是抽象系统实体化的核心。它直接将

时间序列转化为微分方程，它建立的是抽象系统发展变化的动态模型，简记为DM（或GM）。从控制理论的角度看，这是一种新型的建模思想与方法，从数学的角度看，这是一种新的“逼近”途径。关联度是分析各因素关联性的一种量的测度，是灰色系统决策、预测、分析、建模的基础。社会、经济系统许多因素、现象都具有随机性，而灰色系统认为这些都是灰色量。概率论是基于先验信息、统计规律（如概率分布、方差、均值……）等来处理随机量，而灰色系统则是通过关联度，通过数据处理来分析和对待随机量，也就是通过数据到数据的“映射”、时间序列到时间序列的“映射”来处理随机量和发现规律。总之，“关联度”、“灰数据映射”等是建模、预测、决策的基础，是灰色系统的“细胞”。进一步说，建模又是预测、决策、控制的基础，是灰色系统的“心脏”。

为了便于推广，本书尽量避免“数学化”，迫于时间，本书在灰色数学、灰色控制方面没有过多的涉及，这只有待另寻机会与大家见面了。

1982年提出的灰色系统理论，从发展看应是从黑箱、灰箱、再到灰色系统。1945年维纳的Closed Box和1953年艾什比的Black Box都是用来定义内部结构、特性，参数全部未知，只好从对象外部，从对象直接的直观的因果关系、输出输入关系作研究的这一类事物。后来，有人提出了“灰箱”，这是指客观事物中有部分明确的这类问题。由于“灰箱”在学术上特点不多。“箱”意味着仍然是从系统外部特征去研究，“箱”内部分的白信息无法利用。灰色系统则主张打破“箱”的约束，主张着重事物内部（结构、参数、总的特征）研究，尽量发挥现有白信息的作用。

大系统，比如社会、经济系统一般都是部分白、部分灰的灰色系统，这些系统除了时间数据外，其他信息几乎一无所有。为此，七十年代末我们开始研究用时间数据列建立系统动态模型，作了打开控制理论通向社会、经济领域第一个关卡的尝试。在这里的“灰”，是指仅用系统输出（“后果”）的时间数据列，不

涉及别的信息。这里的“内”，则是指模型是微分方程而不是差分方程，是长期发展变化模型，不是短期的变化关系。因为“内”与“外”（对抽象系统而言）实际上是指接近事物本质的程度，了解内在规律的程度。只有认识了事物内部本质，才可能揭示事物发展变化的长期规律；内部本质认识越深，对事物发展变化的长期规律的了解才越长。表面现象、外部特征只能解释事物发展变化的较短过程。

1979年，在钱学森同志主持的军事系统工程学术会议上，作者宣读了“参数不完全大系统的最小信息镇定”。1981年上海召开的中-美控制系统学术会议上，宣读了“含未知参数系统的控制问题”，发言中首次使用“灰色系统”一词。1982年1月，在自动化学报上发表了“参数不完全系统的最小信息镇定”一文。1982年3月，北荷兰出版公司出版的国际杂志《系统与控制通信(SYSTEMS & CONTROL LETTERS)》上发表了“灰色系统的控制问题”，在同年第3期华中工学院学报上发表了灰色系统的第一篇中文的论文“灰色控制系统”。截至1983年底，作者及同行们发表的有关灰色系统的论文（据不完全统计）约有20多篇。

在灰色系统提出到现在这段时间里，它得到了国内外学术界前辈们、同行们的关注、支持和鼓励。国际上，美国哈佛大学布洛克特(Brockett)教授、何毓琦(Y. C. HO)教授、华盛顿大学谈自忠(T. J. TARN)教授，德国数学中心报主编威格尔(WEGNER)教授，法国LASS研究所阿格拉·马赫丹(AGUILAR-MARTIN)教授，日本东京医科齿科大学若松秀俊教授，日本庆应大学下乡太郎教授，他们都用不同方式（如文字、口头、或邀请作学术报告等）表达了对灰色系统的兴趣、关注和支持。

华中工学院学报编辑部对灰色系统的热心扶持，中国未来研究会理事长杜大公同志在全国未来研究会上对灰色系统的鼓励，中国自动化学会理事长宋健同志对灰色系统的推荐，这些为灰色系统这个“婴儿”的诞生和发展起了助产和哺育作用。

国防工业出版社在1982年年底提出了灰色系统出书的建议，这一年多时间里，他们为出书作了许多实质性工作。

作者趁此机会感谢同行们的支持、学术界前辈们的鼓励。

趁此机会，作者还感谢全国农业、计划、经济、社会、管理、科技情报、生物、医学、史学、地质、军事科学、教育、行政、文字语言、生态环境等方面的科技工作者，及在瑞典深造的中国学者等数百封来信中热情的勉励、恳切的心情，特别是那些白发苍苍的高龄长者的殷切期望。作者将这些看作是珍贵的学术友谊，是令人激励的知音。

作者还感谢朱九思院长等有关院系领导的关注和陈绵云同志的合作与帮助。

为此作者以一片诚心献上这个粗糙的作品，希望它成为友谊的使者，向长者汇报的素材，向国内外同行们请教的砖石，并作为开创我国经济新局面的一分心意。

由于时间匆促，错误在所难免，敬请读者批评指正。

邓聚龙

于华中工学院



## 作者简介

邓聚龙 是华中工学院自控与计算机系教授。

他 1955 年毕业于华中工学院电机电器制造专业，从事控制理论、自动化技术方面的教学和研究工作。1978 年以来从事系统理论、模糊控制等方面的研究工作。六十年代提出了“去余控制”，八十年代提出了“灰色系统”等学术见解。在国内外表发了 50 余篇论文。

他还兼任《模糊数学》杂志副主编、《Fuzzy Sets and Systems》国际杂志顾问编辑、中国未来研究会理事、中国系统工程学会系统理论委员会委员等职务。



# 目 录

第一章 灰色系统建模思想	1
1.1 灰色系统当前的研究内容及概况	1
1.2 五步建模的思想与方法	6
1.3 一个五步建模的例子	8
第二章 灰色系统建模方法	18
2.1 灰色模块	18
2.2 微分拟合建模法(微分动态建模法)	21
2.3 常见的线性微分拟合模型	23
2.4 灰白参数共生系统的建模	42
2.5 含灰色数据的模型	43
2.6 窗口模型	45
2.7 离散模型	46
第三章 关联度及关联序	49
3.1 关联分析的意义	49
3.2 关联度	49
3.3 关联度计算技巧	51
3.4 关联极性	52
3.5 关联度的性质	52
3.6 计划与市场经济综合模型	53
3.7 关联度矩阵	54
第四章 灰色系统预测	60
4.1 残差信息	60
4.2 数据残差辨识	61
4.3 多段函数残差辨识	71
4.4 单段函数残差辨识	80
4.5 灰色模块的预测	86
4.6 灰色马尔柯夫模型	88
第五章 灰色系统决策	92

5.1 决策的一些共性问题	92
5.2 灰色区划	110
5.3 灰色物流决策	140
5.4 灰色非线性规划	151
5.5 灰色动态规划	158
5.6 局势决策	163
5.7 层次决策	178
<b>第六章 灰色系统分析</b>	<b>186</b>
6.1 非状态模型转化为状态模型	187
6.2 离散状态模型的可控性	190
6.3 灰色系统离散状态模型的可控性	191
6.4 连续状态模型的可控性	194
6.5 离散系统可观性	195
6.6 连续系统可观性	200
6.7 系统的几种典型结构	200
6.8 离散的灰色系统动态分析	203
6.9 连续的灰色系统动态分析	208
<b>第七章 灰色系统的控制</b>	<b>232</b>
7.1 取样算子	232
7.2 反馈灰色系统特征多项式的自化	233
7.3 灰色动态	234
7.4 去余控制	235
<b>第八章 灰色系统理论应用实例</b>	<b>251</b>
8.1 河南人民胜利渠灰色的多目标序贯决策	251
8.2 棉蚜虫生物防治系统的灰色模型与瓢蚜比	264
8.3 海洋渔业预测	268
8.4 粮食总产量预测	268
<b>参考文献</b>	<b>271</b>

# 第一章 灰色系统建模思想

## 1.1 灰色系统当前的研究内容及概况

客观世界是物质的世界，也是信息的世界。既有大量已知信息，也有不少的未知信息、非确知信息。未知的或非确知的信息，我们称为黑色的。已知信息称为白色的。系统中既含有已知信息又含有未知的非确知的信息，称为灰色的系统。

灰色系统的主要研究内容是

- 灰色系统的建模思想、理论和方法
- 灰色因素的关联分析，灰色关联序理论
- 灰色预测理论和方法
- 灰色决策理论和方法
- 灰色系统分析
- 灰色系统控制
- 灰色系统优化

灰色系统是普遍存在的，因此灰色系统的研究对象包括“社会系统”、“经济系统”、“工程技术系统”、“管理系统”、“生命系统”、“生态系统”、“能量系统”、“气象系统”等等。

灰色系统的描述，目前主要是用

- 灰色参数、灰色数、灰色元素（简称灰元），并记为 $\otimes$
- 灰色方程，包括微分、差分方程、代数方程
- 灰色矩阵
- 灰色群

灰色参数不难在客观世界中找到其实际原型：比如，一棵生长在地上的大树的重量，一个人的准确年龄，一个系统的预测值等都是灰色参数。常见的灰色参数有下述类型

- 下界的， $\otimes \in [c, \infty)$
- 上界的， $\otimes \in (-\infty, \bar{c}]$

- 闭区间的,  $\otimes \in (c, \bar{c})$
- 开区间的,  $\otimes \in (c, \bar{c})$
- 离散的,  $\otimes \in \{\pm 1, \pm 2, \dots, \pm n, \dots\}$

含有灰系数的方程, 即灰方程; 含有灰元素的矩阵称灰矩阵。无论是灰元、灰方程、灰矩阵, 从白化的角度来看, 都不是一个元、一个方程、一个矩阵, 而是有限个或者无限个的全体的总称 (符号集合)。

研究灰色系统的关键是灰元如何处理, 灰系统如何白化、淡化、量化、模型化、优化。

灰元的处理一般有下述途径

(1) 通过几个特殊的白矩阵 (称为取样算子) 对灰阵作用后, 使灰矩阵变白, 这称为“白元提取”。一般用在灰色控制中。

(2) 通过控制措施 (即控制矩阵), 对灰系统作用后, 使灰信息通道堵塞。一般用在控制决策的实施中。

(3) 含有界灰元的系统, 将灰元构造为变化域上的函数, 观测灰元在域内变动时, 系统性质、动态及静态特征有何改变, 系统响应有何规律, 这实际上是研究“灰元变动”到“系统响应”的映射。一般用在系统的趋势分析中。

(4) 有界灰元, 以其上界或下界作为它的估值, 这称为灰元的白化值。然后按灰元白化值进行计算分析。一般用在优化、规划、区划中。

(5) 对有界或无界灰元, 根据某种准则、规则、概念作定量化, 这称为灰元的白色量化, 亦称白化。

(6) 将白元与灰元共生的方程、矩阵作“混杂”的计算。一般用在系统分析中。

(7) 将时间的数据列, 或两个因素的关联序列, 在因素平面, 或时间-数据平面上作图 (作出变化曲线), 然后将曲线垂直地或水平地, 或按某种规则分为几块 (几个平面、几个区段), 这称为灰色的数据分划法。这一般用在决策分析, 预测等方面。

(8) 有界灰元, 按区间进行计算, 即用区间数学来处理

灰数。

(9) 将灰元当作一个不予分割的整体进行处理, 称灰元整体化。

(10) 将灰元在定义域内的值, 一个个地抽取进行处理, 称灰元多点处理。

但是除了如何处理灰元外, 有时更重要的是将一个不甚明确的, 整体信息不足的灰系统如何从结构上、模型上、关系上, 使其由灰变白。比如意图、观点、要求如何概念化, 概念化后如何规范化、模型化。语言形式的模型如何量化, 量化后如何优化, 比如影响系统的因素不明确时如何明确, 明确后如何判断各因素间的相关程度, 根据相关程度如何判断其影响的程度、大小、范围。系统的发展由一无所知, 到知之较多, 由知之较多到认识其变化规律, 从变化规律中获得预测数据, 通过预测再进行决策等都体现了灰色系统灰度逐渐减少, 白度逐渐增加的思想, 这我们称为系统淡化或白化。

灰色系统理论自从 1982 年提出以来, 一年多的时间内, 在理论上和应用上都有明显的进展。比如在主要技术思想上有

- 白色信息充分利用的思想
- 五步建模思想
- 灰色优化思想
- 灰色系统分析思想
- 灰色系统控制思想
- 残差信息概念

在主要的方法上有

- 建模方面的“微分拟合”方法 (动态模型法)
- 削弱随机性的灰色模块法
- 确定预测区域的灰色平面法
- 提高预测精度的残差辨识法
- 确定关联序的关联分析法
- 获得代价尽可能小、效果尽可能大的灰色拉格朗日乘子法

- 对复杂因素，大量分散信息进行统计的灰色统计法
- 对多种元素，在众多的指标下进行分类的灰色聚类法
- 对灰色的规划问题求解的灰色物流、灰色区划等方法

将现在已有的成果和可能获得的成果，将现有的内容和将要进一步研究的内容，概括到一起，有

(1) 社会经济系统宏观时间的五步建模，即

语言模型→网络模型→量化模型→动态模型→优化模型

(2) 模型类型方面有

- 单序列的1阶到 $n$ 阶线性动态模型
- 多序列的1阶到 $n$ 阶线性动态模型
- 非线性动态静态模型

(这些主要用在社会、经济系统的建模方面)

(3) 模型结构方面有

- 白色子块与灰色大块的耦合
- 大系统的等效窗口
- 灰色大系统逐步白化的白色嵌入

(4) 建模方法有

- 微分拟合法(微分动态建模法)
- 灰色模块求解法

(5) 关联分析方面有

- 关联度、关联极性、关联序
- 计划经济与市场经济的关联模型

(6) 灰色预测方面有

- 灰色模块
- 灰色平面
- 数据残差辨识
- 多段函数残差辨识
- 单段函数残差辨识
- 灰色马尔可夫(Markov)模型

(7) 在规划方面有

- 灰色物流
- 灰色非线性规划
- 灰色动态规划
- 灰色区划
- 灰色动态区划

(8) 在决策方面有

- 局势决策
- 层次决策

(9) 非典型系统的动态分析方面有

- 信息补充的特征多项式计算方法

上述内容，有的已在实践中得到某种程度的利用，并已初步取得了成效，比如

- 棉化害虫生物防治（陕西农科院李宝林）
- 镗床控制系统分析（华中工学院陈绵云）
- 新型液压系统的创建（华中工学院李从心）
- 粮食长期预测（华中工学院邓聚龙等）
- 河南人民胜利渠的灌溉决策（河南邓琦、冯清玺、华中工学院邓聚龙）
- 气象预报及形势分析（河南气象学校冯宛平等）
- 区划方面（湖南双峰县）
- 农业经济预测方面（沈阳农学院罗庆成）

在基本理论方面的工作则为数更多，不便一一列举。

因为，一个社会经济系统、工程技术系统，往往是信息流、物流、资金流、能量流、人流的综合系统，其中信息流是流的“灵魂”，资金流往往是其他流如物流、能量流的总的表达形式。在下面的讨论中主要以资金流、信息流为主。

用灰色系统研究社会经济系统的意义，在于将抽象的问题实体化、量化；将变化规律不明显的情况，找出规律，通过规律分析事物的发展变化，分析事物的可控性、可观性、可达性；通过分析说明哪些系统哪些因素是可控的，哪些是不可控的，哪些事物、现

象是将要发生的，哪些是将要消亡的，哪些是生机勃勃的，哪些是消极衰老的，哪些是需要扶持的，哪些是需要制止的、整治的；通过分析揭示系统发展过程的优势、劣势、潜力、危机，通过揭示作出正确决策以防患于未然，以扬长而避短，以变潜力为实力，变不利为有利，变大害为小害为无害，变停滞为发展。总之是确立事实，找出核心，分析问题，找出对策，以促进系统迅速地、健康地、满意地、高效益地发展。

## 1.2 五步建模的思想与方法

研究社会、经济系统最大的障碍是模型的建立。

工程技术系统，建模问题不如社会经济系统那样突出。因为工程技术系统是客观实体，有物理原型，具有可实验性。而社会经济系统，要弄清其有关的因素就不容易，至于量化则更困难。我们提出的五步建模，就是在得到了各种因素间、前因与后果间、作用与响应间的关系后，一个定性到定量，由粗到细，由灰到白的建模过程。

### 1. 语言模型（第一步思想开发）

研究系统首先要明确目的、目标、要求、条件。而这些问题的明确首先要有思想的开发。然后将思想开发后的结果，用准确精练的语言进行描述，这就是语言模型。

毛主席著作中有许多精辟的见解，比如“鼓足干劲，力争上游，多、快、好、省地建设社会主义”。邓小平同志关于实现社会主义现代化建设，开创经济建设新局面的许多精辟论述，都是高层次的语言模型。社会科学中许多结论性的论述也是语言模型。

### 2. 网络模型（第二步明确关系）

在语言模型的基础上，进行因素分析，作前因与后果的辨识，作关系的归纳分解。然后将构成“前因”与“后果”的一对或几对，多个前因或多个后果，作为一个整体（环节），并用方框表示，就得到一个单元网络，或称一个环节的框图，见图 1.1。

图 1.1 中，前因亦称该环节的输入，用  $X_i$  表示，后果亦称该



环节的输出，用  $X_1$  表示。

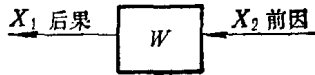


图 1.1

但是系统是多个因素（变量）间相互关联的。作为后果的因素，可能同时又是下一个环节的前因，作为前因的因素，也可能是上一个环节的后果。有时还会相互穿插，交替影响。为此就可能得到图 1.2 所示的多环节框图。我们称它为网络图。

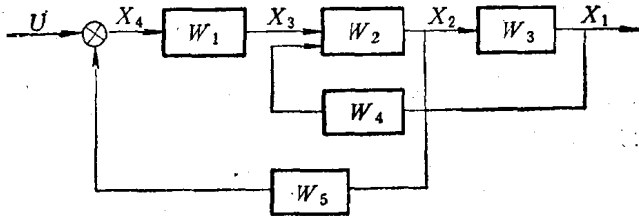


图 1.2

### 3. 量化模型（第三步建立初步的定量关系）

得到网络模型后，搜集前因与后果间的数量关系。比如  $X_1$  与  $X_2$  之间如果有比例系数  $k$ ，

$$X_1 = kX_2$$

则在图 1.1 的方框内填上  $k$ ，这就是量化模型。

### 4. 动态模型（第四步研究前因后果间的动态关系）

上述量化模型，只能说明前因后果间的简单量化关系，它不能说明，“前因”作用在环节上以后，“后果”如何发展变化。“前因”如果随时间而变化，“后果”又如何变，是增长还是衰减，是变得快还是变得慢。显然这些问题的回答得依赖  $X_1$  与  $X_2$  的时间数据序列。通过输出输入的时间数据序列可以建立它们之间的发展变化关系，这称为动态模型。

### 5. 优化模型（第五步模型的改进）

前述动态模型的动态品质如果不能令人满意，则应采取适当