

灰色系统丛书

刘思峰 主编

能源经济 系统灰分析

袁潮清 陈 顶 著



科学出版社

灰色系统丛书

刘思峰 主编

能源经济系统灰分析

袁潮清 陈 顶 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书采用灰色系统理论、方法和模型进行能源经济系统分析。本书充分体现了灰色系统理论与能源经济研究相互融合的特色。内容主要源自作者灰色系统理论及其在能源经济领域中应用的系列研究成果。全书共分 11 章。第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 5 章主要研究了灰色 GM(1, 1) 模型的特性及能源消费灰色预测;第 6 章、第 7 章和第 8 章构建了若干新的灰色关联度模型,分析了能源经济系统中的关联关系;第 9 章、第 10 章和第 11 章将灰色系统理论与线性规划、回归模型等进行了组合应用,用以评估能源政策绩效等问题。本书既有灰色系统理论的一些创新,又有灰色系统理论在能源经济中的系统应用。

本书可供高等学校灰色系统和能源经济方向的研究生学习,也可供相关领域的研究人员参考,还可为相关部门决策提供一定的依据。

图书在版编目(CIP)数据

能源经济系统灰分析 / 袁潮清, 陈顶著. — 北京: 科学出版社, 2017.12
(灰色系统丛书)

ISBN 978-7-03-055581-6

I. ①能… II. ①袁…②陈… III. ①能源经济—经济分析 IV. ①F426.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 290563 号

责任编辑: 李 莉 / 责任校对: 杜子昂

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 无极书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2017 年 12 月第一次印刷 印张: 8 1/2

字数: 172 000

定价: 62.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者简介

袁潮清，男，南京航空航天大学经济与管理学院副教授，管理学博士。主要从事灰色系统理论和能源经济的研究。先后主持国家自然科学基金面上项目、江苏省自然科学基金青年项目、教育部人文社会科学基金青年项目、高等学校博士学科点专项科研基金、江苏省社会科学基金一般项目、国家博士后基金面上项目等 10 余项。发表论文 50 余篇，其中 25 篇被 SCI/SSCI 收录。获江苏省科学技术奖一等奖、江苏省第十四届哲学社会科学优秀成果奖一等奖等重要奖项数项。担任中国软科学研究会理事、中国优选法统筹法和经济数学研究会灰色系统专业委员会副秘书长、国际灰色系统与不确定性分析协会副秘书长。

陈顶，男，南京航空航天大学，博士生。主要从事灰色系统理论、运筹与管理方面的研究。参加国家社会科学基金重大项目、国家自然科学基金面上项目等课题数项，发表论文十余篇，获省部级奖项 1 项。

丛 书 序

灰色系统理论是 1982 年中国学者邓聚龙教授创立的一门以“小数据，贫信息”不确定性系统为研究对象的新学说。新生事物往往对年轻人有较大吸引力，在灰色系统研究者中，青年学者所占比例较大。虽然随着这一新理论日益被社会广泛接受，一大批灰色系统研究者获得了国家和省部级科研基金的资助，但在各个时期仍有不少对灰色系统研究有兴趣的新人暂时缺乏经费支持。因此，中国高等科学技术中心（China Center of Advanced Science and Technology, CCAST）的长期持续支持对于一门成长中的新学科无疑是雪中送炭。学术因争辩而产生共鸣。热烈的交流、研讨碰撞出思想的火花，促进灰色系统研究工作不断取得新的进展和突破。

由科学出版社推出的这套“灰色系统丛书”，包括灰色系统的理论、方法研究及其在医学、水文、人口、资源、环境、经济预测、作物栽培、复杂装备研制、电子信息装备试验、空管系统安全监测与预警、冰凌灾害预测分析、宏观经济投入产出分析、农村经济系统分析、粮食生产与粮食安全、食品安全风险评估及预警、创新管理、能源政策、联网审计等众多领域的成功应用，是近十年来灰色系统理论研究和应用创新成果的集中展示。

CCAST 是著名科学家李政道先生在世界实验室、中国科学院和国家自然科学基金委员会等部门支持下创办的学术机构，旨在为中国学者创造一个具有世界水平的宽松环境，促进国内外研究机构和科学家之间的交流与合作；支持国内科学家不受干扰地进行前沿性的基础研究和探索，让他们能够在国内做出具有世界水平的研究成果。近 30 年来，CCAST 每年都支持数十次学术活动，参加活动的科学家数以万计，用很少的钱办成了促进中国创新发展的大事。CCAST（特别是学术主任叶铭汉院士）对灰色系统学术会议的持续支持，极大地促进了灰色系统理论这门中国原创新兴学科的快速成长。经过 30 多年的发展，灰色系统理论已被全球学术界所认识和接受。多种不同语种的灰色系统理论学术著作相继出版，全世界有数千种学术期刊接收、刊登灰色系统论文，其中包括各个科学领域的国际顶级期刊。

2005 年，经中国科学技术协会（以下简称中国科协）和民政部批准，中国优选

法统筹法与经济数学研究会成立了灰色系统专业委员会,挂靠南京航空航天大学。国家自然科学基金委员会、CCAST、南京航空航天大学 and 上海市浦东新区教育学会对灰色系统学术活动给予大力支持。2007 年,全球最大的学术组织 IEEE 总部批准成立 IEEE SMC 灰色系统委员会,在南京航空航天大学举办了首届 IEEE 灰色系统与智能服务国际会议(GSIS)。2009 年和 2011 年,南京航空航天大学承办了第二届、第三届 IEEE GSIS。2013 年,在澳门大学召开的第四届 IEEE GSIS 得到澳门特别行政区政府资助。2015 年,在英国 De Montfort 大学召开的第五届 IEEE GSIS 得到欧盟资助。2017 年 7 月,第六届 IEEE GSIS 将在瑞典斯德哥尔摩大学举办。

在南京航空航天大学,灰色系统理论已成为经济管理类本科生、硕士生、博士生的一门重要课程,并为全校各专业学生开设了选修课。2008 年,灰色系统理论入选国家精品课程;2013 年,又被遴选为国家精品资源共享课程,成为向所有灰色系统爱好者免费开放的学习资源。

2013 年,笔者与英国 De Montfort 大学杨英杰教授合作,向欧盟委员会提交的题为 Grey Systems and Its Application to Data Mining and Decision Support 的研究计划,以优等评价入选欧盟第 7 研究框架“玛丽·居里国际人才引进行动计划”(Marie Curie International Incoming Fellowships, PEOPLE-IIF-GA-2013-629051)。2014 年,由英国、中国、美国、加拿大等国学者联合申报的英国 Leverhulme Trust 项目以及 26 个欧盟成员国与中国学者联合申报的欧盟 Horizon 2020 研究框架计划项目相继获得资助。2015 年,由中国、英国、美国、加拿大、西班牙、罗马尼亚等国学者共同发起成立了“国际灰色系统与不确定性分析学会”(International Association of Grey Systems and Uncertainty Analysis)。

灰色系统理论作为一门新兴学科已以其强大的生命力自立于科学之林。

这套“灰色系统丛书”将成为灰色系统理论发展史上的一座里程碑。它的出版必将有力地推动灰色系统理论这门新学科的发展和传播,促进其在重大工程领域的实际应用,促进我国相关科学领域的发展。

刘思峰

南京航空航天大学和英国 De Montfort 大学特聘教授
欧盟玛丽·居里国际人才引进行动计划 Fellow (Senior)
国际灰色系统与不确定性分析学会主席

2015 年 12 月

前 言

宏观经济的周期性、经济发展的阶段性、能源环境政策的不确定性、能源环境问题的社会态度动态性、能源价格波动性使能源-经济-环境系统具有极高的复杂性、动态性和不确定性。本书采用灰色系统理论模型与方法,分析能源-经济-环境系统的趋势、特征和结构,更好地揭示了其阶段特征和最新态势。本书主要包括以下几个方面的内容。

(1) 研究了灰色 GM(1,1) 模型的性质。一是揭示了灰色累加生成能有效弱化灰色不确定性;二是验证了灰色 GM(1,1) 模型对线性增长序列的适用性。

(2) 分析了 GM(1,1) 模型的建模最佳序列长度,解决了灰色 GM(1,1) 小样本建模的可靠性问题。在序列增长较快的情况下,4 个数据建模最好;在序列增长较慢的情况下,5 个或者 6 个数据建模最好。对 GM(1,1) 模型群进行了分析研究,在序列增长较慢时,采用新陈代谢模型进行中长期预测要更好。

(3) 在能源消费预测中,对 GM(1,1) 模型和 ARIMA(autoregressive integrated moving average, 即差分自回归移动平均) 模型进行了对比:GM(1,1) 模型预测结果能更好地体现能源消费的最新动态,而 ARIMA 模型则准确地揭示了其长期增长趋势。

(4) 采用灰色关联度分析了中国经济和能源消费的关系,较好地揭示了二者的阶段性特征;构建了始点优化的灰色关联模型,并用其分析了中国光伏产业产能过剩的原因;构建了基于灰色关联度的接近度和相似度模型,分析中国国内汽油价格和国际油价的关系。灰色关联度不同于线性相关,而且对于大样本的关联关系,也可以采用灰色关联度进行分析。

(5) 综合运用灰色缓冲算子、GM(1,1) 模型和计量模型等测算了中国节能政策以及技术进步的节能效果。

(6) 采用灰色线性规划模型,研究了未来中国碳排放和经济发展之间的关系,揭示了经济发展和节能减排之间的矛盾和冲突,预警了经济发展中可能的失业和水资源短缺等问题。

本书在写作和出版过程中,受到了南京航空航天大学刘思峰教授的精心指导;得到了英国 De Montfort University (德蒙福特大学)的 Yingjie Yang 教授,中国南京航空航天大学方志耕教授、党耀国教授、江可申教授、王英教授、张伟教授、邓晶副教授,以及科学出版社李莉老师的大力支持;南京航空航天大学许军、许诺和朱玉欣等同学也给予了热情帮助。在此向他们表示衷心的感谢!

本书的出版得到了国家自然科学基金面上项目(71573120)、高等学校博士学科点专项科研基金(20133218120036)、江苏省自然科学基金青年项目(BK20130785)、南京航空航天大学青年科技创新基金(理工类)(NS2015084)、江苏省社会科学基金一般项目(16EYB013)等项目的资助和支持,在此表示感谢!

袁潮清

2017年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 世界是灰的且灰性不灭	1
1.2 能源-经济系统的灰性	3
第 2 章 灰色 GM (1,1) 模型及其适用性	4
2.1 GM (1,1) 模型	4
2.2 GM (1,1) 模型对不确定性的弱化	6
2.3 GM (1,1) 模型对线性增长序列的适用性	10
本章附件: GM (1,1) 模型不确定性弱化随机仿真试验结果	17
第 3 章 GM (1,1) 模型建模最佳序列长度	21
3.1 随机序列试验设计	21
3.2 随机仿真试验的结果	22
3.3 案例研究	25
本章附件: 案例数据与验证过程	27
第 4 章 GM (1,1) 模型群	36
4.1 GM (1,1) 模型群简介	36
4.2 基于随机仿真试验的 GM (1,1) 模型群预测效果辨析	37
4.3 全球石油消费预测	42
第 5 章 能源消费的灰色预测与趋势分析	44
5.1 中国一次能源消费预测	44
5.2 全球能源消费预测	50
第 6 章 中国经济产出与能源消费的灰色关联分析	54
6.1 广义灰色关联度	54
6.2 中国能源消费与经济增长的关系研究: 基于分阶段、小样本的分析	56
第 7 章 中国光伏产业产能过剩的灰因分析	64
7.1 始点优化灰色关联度	64

7.2	数值例子	65
7.3	中国光伏产业产能过剩的主要原因的灰关联分析	67
第 8 章	中国油价和国际油价的灰关联分析	69
8.1	灰色关联度模型	69
8.2	基于灰色关联度的序列接近度和相似度模型	71
8.3	数值算例	77
8.4	国内油价和国际油价的关系	78
第 9 章	中国技术进步节能效果测算	82
9.1	平均弱化缓冲算子	83
9.2	模型	84
9.3	数据	86
9.4	实证研究	89
第 10 章	中国能源政策节能效果的评价	92
10.1	中国主要节能政策	93
10.2	模型	95
10.3	数据	96
10.4	中国能源政策节能效果测算	99
第 11 章	中国经济发展与碳排放的关系研究	103
11.1	碳排放强度变化的分解	103
11.2	中国三次产业结构调整的减排效果研究	104
11.3	基于减排的产业结构规划模型	107
11.4	减排目标下的中国产业结构调整规划	110
参考文献		120

第1章 绪 论

1.1 世界是灰的且灰性不灭

如果“知道”就是“确定地知道”，那么未来实际上就是不可知的（Andrew, 1994）。人类所建立的科学理论，是对现实世界观察而得到的最好的经验或者假说，是人类认识世界的结果。仅仅由于平行公理的不同，欧几里得、罗巴切夫斯基几何和黎曼几何分别演绎出不同的内容体系。这说明科学理论是在不断发展和进化的。从某种意义上说，理论永远也不能被证明，而只能被证伪（Popper, 2005）。即使看起来完全正确的科学理论体系，其实也并不能保证其能一直正确。换言之，科学理论本身就是灰的。科学的发展没有尽头，科学理论与生俱来的灰性是永不消失的。

在现实生产生活实际中，灰性也是处处存在的，举例如下。

（1）一个加工好的零件，经检验其实际尺寸在规定范围之内即为合格，如图 1.1 所示。反过来说，一个合格零件的实际尺寸可以表达为其极限尺寸所构成的区间灰数。

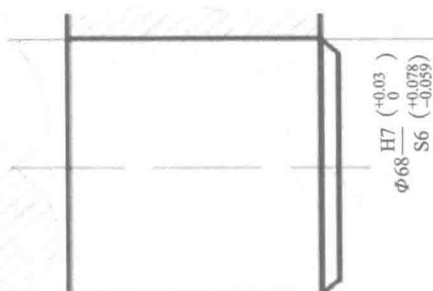


图 1.1 零件尺寸

（2）前几年国家统计局公布的 GDP（国内生产总值）与地方公布的生产总值

不一致，说明了统计数据虽然是干脆数（crisp number），但实际上却是灰的。

2009 年各省（自治区、直辖市）生产总值之和超出全国总量 2.68 万亿元；
2010 年各省（自治区、直辖市）生产总值之和超出全国总量 3.5 万亿元；
2011 年各省（自治区、直辖市）生产总值之和超出全国总量 4.6 万亿元；
2012 年各省（自治区、直辖市）生产总值之和超出全国总量 5.76 万亿元；
2013 年各省（自治区、直辖市）生产总值之和超出全国总量 6.1 万亿元。

（3）中国成品油定价机制规定了成品油价格调整的时间窗口，但是调整的幅度并未明确说明，如表 1.1 所示，它具有很强的灰性。

表 1.1 中国成品油定价机制

日期	定价机制
2009 年 5 月 8 日	依据三地原油（辛塔、迪拜、布伦特）22 个工作日的移动加权均价涨跌幅超过 4%，相应上调或下调成品油价格
2013 年 3 月 27 日	新成品油定价机制将调价周期缩短至 10 个工作日，取消上下 4% 的幅度限制。为节约社会成本，当汽、柴油调价幅度低于每吨 50 元时，不作调整，纳入下次调价时累加或冲抵
2016 年 1 月 13 日	（一）设定成品油价格调控下限。（二）建立油价调控风险准备金。（三）放开液化石油气出厂价格。（四）简化成品油调价操作方式

这些事例的共同特征就是部分信息已知，部分信息未知，而对于这类灰色不确定性问题，概率论、模糊数学等不确定性理论都显不足。

2016 年的美国总统大选就很好地说明这一点。在大选前，民意调查几乎一致看好希拉里。而这种大量样本的问卷调查，是以概率统计为理论基础的，从理论上说应该能客观、精确地反映民意动向。这说明概率论的公理体系本身非常完美，但是用在解决实际问题时，却出现了偏差。就美国大选而言，问题显然不是出在统计理论上，可能的原因有三：民调的对象不能代表全部选民；投票的数据收集和存储问题；选民行为的不确定性。

在民调过程中，很多特朗普的支持者未能被调查到。美国大城市一向是民主党票仓，特朗普支持者更多分布在城市郊区和农村地区。《纽约时报》执行主编迪安·巴塞特在反思时说，作为以大都市纽约为大本营的新闻媒体，必须更好地深入整个国家，与更多背景不同的民众交谈接触，而不是把纽约当作整个世界。NBC（National Broadcasting Company，即美国全国广播公司）新闻主播汤姆·布罗考在探究媒体为何对投票选民多元化结构估计过高时也指出，主流媒体大都位于沿海大城市，视野受到局限（新华网，2016），这导致了民调的对象不能代表全部选民。美国大选以来，美国一直指责俄罗斯“用黑客行为干扰了美国大选”。美国一些计算机专家质疑投票系统可能被黑客入侵，而且美国威斯康星州选举委员会在绿党总统候选人吉尔·斯坦的申请下重新计票（腾讯网，2016）。而 2017 年 1 月 8

日,特朗普团队首次承认,俄罗斯黑客曾经入侵并干扰美国大选(腾讯网,2017),相应数据的收集、存储和传输都有可能出问题。而投票的白人蓝领数量大大超过预期,大量支持特朗普的“沉默的投票者”并没有在民调中表达自己的真实想法,白人在投票选民总数中占比 69%,少数族裔占 31%。人的行为带来了极大的不确定性,民调对象选择、黑客攻击和选民行为所引致的不确定性,都是概率等不确定性方法难以解决的。

即使是大数据,也不能解决灰色不确定性的问题。“谷歌流感趋势”(Google flu trends, GFT)常被看作大数据分析优势的明证。但 2009 年, GFT 没能预测到非季节性流感 A-H1N1;在 2011~2012 年, GFT 预测的发病率是 CDC (Centers for Disease Control and Prevention, 即美国疾病控制与预防中心)报告值的 1.5 倍多;而到了 2012~2013 年, GFT 预测的流感发病率已经是 CDC 报告值的 2 倍多,而只用两周前 CDC 的历史数据来预测发病率,其表现也要比 GFT 好很多(Lazer et al., 2014)。这说明大数据同样面临着灰色信息的挑战,因为年轻人的行为更容易被捕捉,而且网络搜索的动机也无法分析。

1.2 能源-经济系统的灰性

经济周期性(董进,2006;林建浩和王美今,2016)、经济发展的阶段性(郭克莎,2016;陈纪平,2016)、能源环境政策的不确定性(如美国新任总统特朗普对气候变化政策的态度)、能源环境问题的社会态度动态性(如因为雾霾中国能源环境问题得到社会极度重视)、能源价格波动性使能源-经济-环境系统具有极高的复杂性、动态性和不确定性。

采用计量模型,可以分析能源经济系统存在的长期、稳定的均衡关系。而对于能源-经济-环境系统的不确定性和动态性,采用灰色系统理论方法则可以更好地把握阶段特征和最新趋势。

第2章 灰色GM(1,1)模型及其适用性

2.1 GM(1,1)模型^①

1. GM(1,1)模型基本形式

定义 2.1 设

$$X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$$

$$X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$$

称

$$x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b \quad (2.1)$$

为 GM(1,1) 模型的原始形式。

符号 GM(1,1) 的含义如下：

G
↑
grey
(灰色)

M
↑
model
(模型)

(1,
↑
1阶方程

1)
↑
1个变量

定义 2.2 设 $X^{(0)}, X^{(1)}$ 如定义 2.1 所示。

$$Z^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n))$$

$$\text{其中, } z^{(1)}(k) = \frac{1}{2}(x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1))$$

称

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (2.2)$$

^① 邓聚龙. 灰理论基础. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002; 刘思峰. 灰色系统理论及其应用. 第5版. 北京: 科学出版社, 2010.

为 GM (1,1) 模型的基本形式。

2. GM (1,1) 模型参数估计

设 $X^{(0)}$ 为非负序列,

$$X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$$

其中, $x^{(0)}(k) \geq 0, k=1, 2, \dots, n$; $X^{(1)}$ 为 $X^{(0)}$ 的 1-AGO (accumulated generating operation, 即累加生成) 序列。

$$X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$$

其中, $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), k=1, 2, \dots, n$; $Z^{(1)}$ 为 $X^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列。

$$Z^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n))$$

其中, $z^{(1)}(k) = \frac{1}{2}(x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)), k=2, 3, \dots, n$ 。

若 $\hat{a} = (a, b)^T$ 为参数列, 且

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

则 GM (1,1) 模型 $x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b$ 的最小二乘估计参数列满足

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y$$

3. GM (1,1) 模型求解

定义 2.3 设 $X^{(0)}$ 为非负序列, $X^{(1)}$ 为 $X^{(0)}$ 的 1-AGO 序列, $Z^{(1)}$ 为 $X^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列, $[a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y$, 则称

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b$$

为 GM (1,1) 模型。

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$$

的白化方程, 也叫影子方程。

定义 2.4 设 $B, Y, \hat{a}$ 如式 (2.3) 所述, $\hat{a} = [a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y$, 则:

(1) 白化方程 $\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b$ 的解也称时间响应函数:

$$x^{(1)}(t) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-at} + \frac{b}{a} \quad (2.4)$$

(2) GM (1,1) 模型 $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$ 的时间响应序列为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak} + \frac{b}{a}, \quad k=1,2,\dots,n \quad (2.5)$$

(3) 还原值

$$\begin{aligned} \hat{x}^{(0)}(k+1) &= \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \\ &= (1 - e^a) \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak}, \quad k=1,2,\dots,n \end{aligned} \quad (2.6)$$

GM (1,1) 模型中的参数 $-a$ 为发展系数, b 为灰色作用量。

2.2 GM (1,1) 模型对不确定性的弱化

对一个随机序列 (x_1, x_2, x_3, x_4) , 其中, $x_i = a + \varepsilon_i$, $i=1,2,3,4$, 且 $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ 独立同分布。 $x_1, x_1+x_2, x_1+x_2+x_3$ 和 $x_1+x_2+x_3+x_4$ 的变异系数相同, 这说明相对于均值, 它们的变动程度是相同的。但是从 GM (1,1) 模型的角度来看, 就有所不同。假设随机分布是对称的, ε_i 符号可能是正也可能是负, 而且概率均为 0.5。在 GM (1,1) 模型 1-AGO 过程中, 由于符号可能不同, 这些随机的扰动会部分地相互抵消, 而且这种可能性非常大, 如图 2.1 所示。

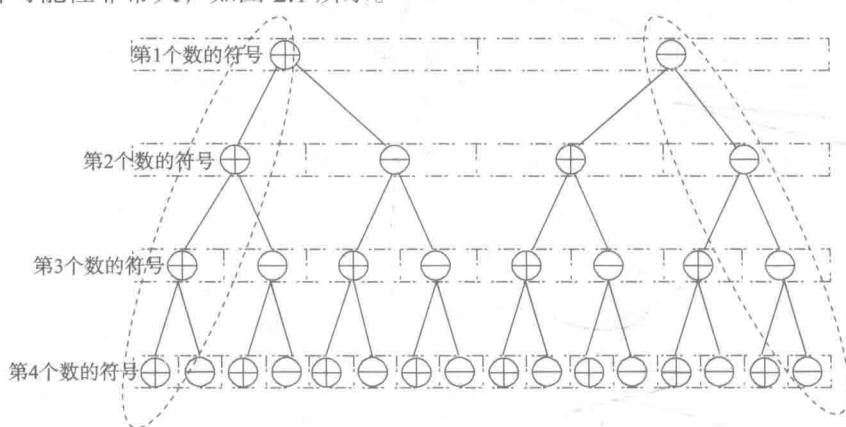


图 2.1 随机扰动的符号

在图 2.1 中, 每一层表示原始序列的一个数据。GM (1,1) 模型可以用 4 个数据建模, 所以共有 4 层。每一层的数据有一个随机扰动, 其符号可能为正, 也可能

为负。图 2.1 中的每一个路径都描述了一个序列的各个扰动项的符号。除了最左边和最右边的两条路径外,其他的路径由于扰动项的符号不同会弱化随机扰动的影响,即 1-AGO 能弱化随机扰动的影响。基于 1-AGO 建立的 GM (1,1) 模型,所得到的拟合值,应该能更加贴近真实数据序列,本节将通过随机仿真试验的方法来检验这一假设。之前这一方法已经被用于检验 GM (1,1) 模型的准确性 (Zhang, 2013)。

1. 仿真试验设计

随机仿真试验框架的设计需要解决以下几个问题:如何生成序列?如何利用这些序列进行 GM (1,1) 建模?如何对试验结果进行分析?因此,试验将按照以下步骤进行。

1) 随机序列的生成

指数序列是 GM (1,1) 模型以及其衍生模型最常用的建模序列 (谢乃明和刘思峰, 2005)。同样,本节也将采用指数序列。考虑随机扰动,将指数序列定义如下:

$$x^{(0)}(t+1) = x^{(0)}(1)e^{-at} + u(t) \quad (2.7)$$

在生成指数序列时,参数 a 应该正确设定。对 GM (1,1) 模型,发展系数 a 决定了序列 $x^{(0)}$ 和 $x^{(1)}$ 的发展趋势。发展系数 a 取值范围为 $a \in (-2, 2)$ (刘思峰和邓聚龙, 2000)。而且已有结果表明发展系数 a 越小, GM (1,1) 模型建模效果越好 (Zhang, 2013), 发展系数 a 的取值将参照这些结果。发展系数 a 的一些取值区间如表 2.1 所示,而其具体的取值将随机生成。

表 2.1 参数和变量的设定

参数和变量	取值范围
$x^{(0)}(1)$	10~100
a	0~0.1
	0.1~0.2
	0.2~0.3
$u(t)$	$\sigma = 1\% \times x^{(0)}(1)$
	$\sigma = 2\% \times x^{(0)}(1)$
	$\sigma = 3\% \times x^{(0)}(1)$

$x^{(0)}$ 序列的始点也应生成,其将在区间[10,100]中随机生成。实际问题中的变量取值可以通过变换计量单位,使其落入这个区间。例如,中国的 2014 年 GDP 为 636 463 亿元,它可以表示为 63.646 3 万亿元,落在了[10,100]区间。当然,其他的区间也同样可以适用。

通常,假定随机扰动 $u(t)$ 服从正态分布,即 $u(t) \sim N(0, \sigma^2)$ 。为了分析不同扰动大小的影响,在生成随机扰动时,将采用 3 个不同的均方差,如表 2.1 所示。

2) GM (1,1) 模型建模

生成的指数序列的长度为 4,式 (2.7) 包含随机扰动的序列,称为原始序列,