

国家自然科学基金项目 (71301060)

教育部人文社会科学青年基金项目 (11YJC630032) 资助

灰色建模技术

及其在自然灾害非常规突然事件 人员伤亡预测中的应用

崔 杰 著

HUISE JIANMO JISHU

Jiqizai Ziranzaizhai Feichanggui Turan Shijian Renyuan
Shangwang Yucezhong de Yingyong



电子科技大学出版社

国家自然科学基金项目 (71301060)

教育部人文社会科学青年基金项目 (11YJC630032) 资助

灰色建模技术

及其在自然灾害非常规突然事件 人员伤亡预测中的应用

HUISE JIANMO JISHU

Jiqizai Ziranzaikai Feichanggui Turan Shijian Renyuan
Shangwang Yucezhong de Yingyong

崔杰著



电子科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

灰色建模技术及其在自然灾害非常规突然事件人员伤亡预测中的应用 / 崔杰著. —成都: 电子科技大学出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-5647-3004-8

I. ①灰… II. ①崔… III. ①灰色系统理论—应用—自然灾害—突发事件—处理—研究 IV. ①X43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 108049 号

灰色建模技术及其在自然灾害 非常规突然事件人员伤亡预测中的应用

崔 杰 著

-
- 出 版: 电子科技大学出版社(成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)
- 策划编辑: 李波翔
- 责任编辑: 徐 波
- 主 页: www.uestcp.com.cn
- 电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn
- 发 行: 新华书店经销
- 印 刷: 四川煤田地质制图印刷厂
- 成品尺寸: 146 mm×208 mm 印张 5.875 字数 160 千字
- 版 次: 2015 年 12 月第一版
- 印 次: 2015 年 12 月第一次印刷
- 书 号: ISBN 978-7-5647-3004-8
- 定 价: 20.00 元
-

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

前 言

20 世纪 50 年代以来,系统科学与系统工程领域不断涌现出研究各种不确定性系统的理论与方法,如模糊数学、粗糙集、未确知数学等。在不确定性理论研究盛行的背景下,1982 年,中国著名学者邓聚龙教授创立了灰色系统理论。三十多年来,该理论得到了迅速发展,它以“部分信息已知,部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定性系统为研究对象,主要通过对部分已知信息的生成、开发,提取有价值的信息,实现对系统的结构性质、演化规律的正确描述与有效监控。随着科学技术的发展,人类所面临的系统越来越复杂,表征系统的信息灰度也越来越大,需要解决的实际问题也越来越多,灰色系统理论也面临新的发展契机。近年来,灰色系统理论发展迅速,其理论研究体系已初步建立,尤其在农业、经济、管理、医疗、教育等众多领域的广泛应用,已得到学术界的充分肯定和认可。

本书介绍了灰色系统理论中灰色预测、灰色关联分析、灰色决策三大灰色建模技术及其应用。根据新信息优先原理构建了一系列新的弱化缓冲算子和新的强化缓冲算子;提出了面向具有近似非齐次指数律特征序列的灰色 NGM 预测模型,并对该模型的相关建模参数进行了优化;采用三级参数包技术、矩阵条件数对灰色 NGM 模型、灰色 verhulst 模型、灰色 verhulst 拓展模型等灰色预测模型的参数特性进行了研究;首次提出灰色关联度仿射性与仿射变换保序性的概念,并对系列灰色关联度模型的仿射性与仿射变换保序性进行理论证明,建立了一种新的灰色相似关联度模型。设计一种基于灰色关联度的决策指标权重求解算法,构建了一种灰色多阶段动态决策模型。最后将上述灰色建模技术应用

于自然灾害类非常规突然事件人员伤亡演化预测中。书中融入了灰色系统理论、方法的最新研究成果，其中许多内容是作者长期科研与教学成果的凝练。

本书主要特色是强调灰色建模技术的应用性，尽量减少繁琐数学证明的介绍，在介绍灰色建模技术新方法基础上，用实例来说明灰色建模新方法的具体应用，努力突出灰色系统理论思想在实际案例中的应用。

本书得到了国家自然科学基金(71301060)和教育部人文社会科学青年基金(11YJC630032)的共同资助，在此表示衷心地感谢！

灰色系统理论属于一门新兴学科，仍处于不断发展、完善过程之中，加上作者知识水平的局限性，书中难免存在不足之处，恳请有关专家和广大读者批评指正！

崔杰

2015年4月13日

目 录

第 1 章 灰色建模技术的研究现状	1
1.1 灰色建模技术研究目的与意义	1
1.2 灰色建模技术的研究现状	4
1.2.1 缓冲算子	4
1.2.2 灰色预测模型	5
1.2.3 灰色关联分析模型	9
1.2.4 灰色决策模型	11
1.3 本书内容安排与技术路线	13
1.3.1 内容安排	13
1.3.2 技术路线	13
1.4 本章小结	14
第 2 章 缓冲算子	15
2.1 缓冲算子的定义及公理	15
2.2 弱化缓冲算子	18
2.2.1 弱化缓冲算子的构建	18
2.2.2 弱化缓冲算子的应用	30
2.3 强化缓冲算子	32
2.3.1 强化缓冲算子的构建	32
2.3.2 强化缓冲算子的应用	44
2.4 本章小结	47

第3章 灰色预测模型的构建及优化	48
3.1 NGM (1,1,k) 模型的构建	49
3.1.1 NGM (1,1,k) 模型的构造	49
3.1.2 灰色 NGM (1,1,k) 模型的应用	53
3.2 NGM (1,1,k) 模型的拓展与初始值优化	54
3.2.1 NGM (1,1,k) 模型的三种形式	55
3.2.2 优化的 NGM (1,1,k) 模型	56
3.2.3 优化的 NGM (1,1,k) 模型参数求解	57
3.3 NGM (1,1,k) 模型背景值的优化	58
3.3.1 NGM (1,1,k) 模型背景值的误差分析	58
3.3.2 NGM (1,1,k) 模型背景值的优化	59
3.4 本章小结	61
第4章 灰色预测模型的特性研究	62
4.1 NGM (1,1,k) 模型的数乘特性	63
4.1.1 NGM (1,1,k) 模型参数包的定义	63
4.1.2 数乘变换下 NGM (1,1,k) 模型的参数特性	66
4.2 NGM (1,1,k) 模型的病态性	69
4.2.1 病态方程组与矩阵条件数	69
4.2.2 NGM (1,1,k) 模型的参数识别方法及其病态性度量	71
4.3 灰色 Verhulst 预测模型的数乘特性	79
4.3.1 灰色 Verhulst 模型的定义	79
4.3.2 数乘变换下 Verhulst 模型的参数特性	82
4.3.3 案例分析	85
4.4 灰色 Verhulst 预测模型的病态特性研究	86
4.4.1 病态方程组与矩阵谱条件数	86

4.4.2	灰色 Verhulst 模型的参数识别方法及其病态性度量	87
4.4.3	实例分析	96
4.5	灰色 Verhulst 拓展预测模型的数乘特性	97
4.5.1	灰色 Verhulst 拓展模型及其参数包	98
4.5.2	灰色 Verhulst 拓展模型的数乘特性	100
4.5.3	实例分析	103
4.6	灰色 Verhulst 拓展预测模型的病态特性	104
4.6.1	病态方程组与矩阵条件数	104
4.6.2	灰色 Verhulst 拓展模型的病态性度量	105
4.7	本章小结	113
第 5 章	灰色关联分析模型及性质	114
5.1	邓氏关联度模型及其优化	114
5.1.1	灰色关联因素及其公理	114
5.1.2	邓氏关联度模型的优化	116
5.1.3	优化邓氏关联度模型的应用	117
5.2	几类关联度模型的性质研究	119
5.2.1	灰色关联度的性质及常见关联度	119
5.2.1	几类灰色关联度模型的仿射性	123
5.2.1	几类灰色关联度模型的仿射变换保序性	127
5.3	灰色相似关联度模型研究	132
5.3.1	灰色相似关联度模型的构建	132
5.3.2	灰色相似关联度模型的性质研究	133
5.3.3	灰色相似关联度模型的应用研究	135
第 6 章	灰色决策模型	137
6.1	基于灰色关联度求解指标权重的改进方法	137

6.1.1	求解指标权重的灰色关联度法	138
6.1.2	基于灰色关联度求解指标权重的改进方法	140
6.2	灰色多阶段动态决策模型	143
6.2.1	灰色决策预备知识	144
6.2.2	灰色多阶段动态决策模型的算法	145
6.2.3	实例分析	146
第 7 章	基于灰色建模技术的自然灾害类非常规突发事件 人员伤亡演化预测仿真研究	150
7.1	研究背景	150
7.2	研究意义与应用前景	152
7.3	自然灾害类非常规突发事件人员伤亡演化预测 模型及其算法设计	154
7.4	NGM 模型时间响应式的求解及仿真分析	158
7.5	本章小结	160
参考文献		162

第 1 章 灰色建模技术的研究现状

1.1 灰色建模技术研究目的与意义

由于系统内外扰动因素的存在以及认识能力的局限,人们在系统研究过程中所获得的信息常常具有某种不确定性。随着科学技术的发展,人们对各类不确定性问题的认识逐步深化,对各种不确定性系统的研究也日益深入^[1,2]。20 世纪 50 年代以来,系统科学与系统工程领域不断涌现出研究各种不确定性系统的理论与方法,如模糊数学、粗糙集、未确知数学等^[3-5]。在不确定性理论研究盛行的背景下,1982 年,中国学者邓聚龙教授创立了灰色系统理论。30 多年来,该理论得到了迅速发展,它以“部分信息已知,部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定性系统为研究对象,主要通过对部分已知信息的生成、开发,提取有价值的信息,实现对系统的结构性质、演化规律的正确描述与有效监控^[6,7]。随着科学技术的发展,人类所面临的系统越来越复杂,表征系统的信息灰度也越来越大,需要解决的实际问题也越来越多,灰色系统理论也面临新的发展契机^[8-10]。近年来,灰色系统理论发展迅速,其理论研究体系已初步建立,尤其在农业、经济、管理、医疗、教育等众多领域的广泛应用,已得到学术界的充分肯定和认可。

灰色系统理论的主要任务是根据社会、经济、生态等系统的行为特征数据,寻找因素间或因素自身的数学关系与变化规律。现实生活中各种系统的行为特征数据常常因受到外界诸多扰动因素的冲击而变得失真。为准确把握事物的本质规律,必须排除扰

动因素对系统的干扰。缓冲算子就是为解决该问题而产生的,它通过灰色序列生成,弱化数据的随机性,还原数据以真实面目,从而使其呈现应有的规律性,进而进行有效地预测^[11,12]。目前,缓冲算子在各类受扰动因素冲击的系统灰色预测建模中已得到了广泛应用。然而,在系统预测过程中,常常出现受扰动因素冲击的系统特征数据序列经序列算子缓冲作用后建模效果依然不甚理想的现象。通过分析,我们发现上述问题的主要原因是已有序列缓冲算子无法对体现系统特性的新信息进行充分挖掘和有效利用。由于现实中存在大量因受扰动因素冲击而数据失真的系统,而缓冲算子又是提高这类系统特征序列建模精度的有效工具。所以,在现有研究成果的基础上,根据新信息优先利用原理,构建新的缓冲算子,对于丰富缓冲算子理论研究体系,拓展其应用范围,进一步提高受扰动因素冲击的系统特征序列建模精度等具有重要的理论意义和应用价值。

灰色预测模型是灰色系统理论体系的一个重要组成部分。其中,GM(1,1)模型是目前最具代表性、应用最为广泛的一种灰色预测模型。它通过特有的灰生成建模方式,先将具有少数数据、贫信息特性的系统原始特征序列进行累加,使其具有递增特性的灰指数律,再利用灰色差分方程与灰色微分方程对累加生成后的数据进行建模,最后通过累减生成的方式进行系统特征序列的模拟与预测。实际应用表明,该模型具有广泛的适用性,通常在实践中能够取得较好的预测效果。然而,在系统特征序列的预测过程中,GM(1,1)模型常常出现建模误差较大的现象,预测结果甚至令人无法接受。针对这一问题,众多学者分别从原始序列光滑度、初始值、建模方式等不同角度已对该模型进行了大量的优化与拓展研究,取得了一定的进展。令人遗憾的是,众多改进后的灰色模型在实际系统行为特征数据序列的预测应用中依然常常出现预测效果不甚理想的现象。那么,产生这种现象的根源何在?

纵观现有灰色预测模型的研究成果,我们发现,目前绝大部分灰色模型的研究成果均仅从模型建模参数的角度进行了优化研究,即对原模型进行不断地修正,以提高其建模精度,却忽视了GM(1,1)模型在拟合预测数据序列类型方面存在的局限性。本文将继承累加生成这一特有的灰色建模方式,根据灰色预测模型的建模机理,构建一种适用于拟合预测具有近似非齐次灰指数律、小样本数据序列的灰色预测模型,对该模型的建模参数进行优化,并对模型的参数特性进行深入研究。研究成果对于丰富灰色预测模型的理论体系、拓展灰色预测模型的应用范围均具有重要的理论意义与现实意义。

灰色关联分析模型是研究小样本、少数据、贫信息不确定性系统内部因素间关联程度的一类数学方法,它通过研究系统因素间的序列所刻画的曲线之间几何位置的接近程度或曲线间的相似程度来体现系统因素之间关系的密切程度,主要用于系统因素分析、优势分析和方案决策等,近年来已成为灰色系统理论研究相对活跃的一个分支。目前,灰色关联分析理论还存在许多有待解决的理论问题。本文将对灰色关联分析模型的仿射特性、仿射变换保序性,以及相似关联分析模型的构建等研究,对于进一步丰富与完善灰色关联分析理论体系,推动该理论的发展,拓展其应用范围等均具有十分重要的理论意义和应用价值。

灰色不确定性决策是现代决策科学的重要组成部分,是从20世纪80年代后期开始逐步发展起来的一类解决不确定性决策问题的分析方法。目前,关于灰色决策方法的研究主要集中在一次性决策方面。然而在实际决策问题的研究过程中,由于认识能力的有限性,事物本身的复杂性,信道噪音的干扰,以及信息接受能力的局限性等,人们在一次性系统识别过程中,往往只能获得部分已知、部分未知的灰色不确定信息。将灰色系统理论中新信息充分利用原理与经典决策分析理论相互融合,构建灰色多阶段

动态决策模型,对于灰色决策分析领域的研究,既具有重要的理论意义,又具有广泛的应用价值。

1.2 灰色建模技术的研究现状

1.2.1 缓冲算子

关于缓冲算子的研究一直备受灰色系统理论学者们的关注与重视,尤其是缓冲算子的理论与应用研究更为突出。刘思峰教授于20世纪90年代建立了缓冲算子的概念和公理系统,研究了缓冲算子的特性,构造了若干具有普遍意义的实用弱化算子与强化算子。该算子能够对系统因受扰动冲击而造成数据失真、不符合建模条件的数据序列进行缓冲处理,以便取得更好的模拟和预测效果^[13-15]。尹春华、顾培亮利用二阶弱化算子对我国能源消费进行了短期预测^[16]。谢乃明、刘思峰提出了一种新的弱化缓冲算子^[17]。党耀国、刘思峰、刘斌、关叶青等通过对缓冲算子的研究先后构造了若干个具有普遍意义的实用弱化算子以及强化缓冲算子,使得冲击扰动系统数据序列在建模预测过程中常常出现的定量预测结果与定性分析结论不符的问题得到有效解决^[18, 19]。刘以安、陈松灿等把灰色系统理论中的缓冲算子引入到多雷达目标跟踪领域,并通过对原始冲击扰动序列的改进来弱化其随机性,同时应用数据融合技术,对缓冲算子作用后的随机振荡序列作进一步改善和提高雷达系统的跟踪精度^[20]。谢乃明、刘思峰等构造了若干个强化缓冲算子,并对其性质进行了研究^[21]。关叶青、刘思峰等构造和整合了强化缓冲算子,证明了多阶强化缓冲算子的计算公式,并比较所构造强化缓冲算子的缓冲作用^[22]。何勇刚、周步祥利用缓冲算子对历史负荷序列进行作用,有效地控制灰色模型的发展系数,较好地解决了负荷预测偏差较大的问题^[23]。党耀国、

刘思峰对一类强化缓冲算子的性质进行了研究^[24]。关叶青、刘思峰在缓冲算子公理体系下,构造了一类线性的弱化缓冲算子和强化缓冲算子,定义了这类缓冲算子的算子矩阵,研究了他们的一些特性^[25]。纵观现有的研究文献,可以发现,目前关于缓冲算子的研究可分为缓冲算子构建的理论研究和利用缓冲算子解决实际问题的应用研究等两个方面。关于缓冲算子的研究还存在如下问题:现有的缓冲算子对于新信息缺乏充分的利用,在一定程度上影响了系统数据序列的建模精度,需要构建系列新的缓冲算子以进一步提高预测精度。在各类缓冲算子的数学特性和适用范围等方面的研究尚未取得突破性进展,需要进一步展开深入研究。

1.2.2 灰色预测模型

灰色预测模型是灰色系统理论的重要组成部分,经过二十多年的发展,其已在农业、工业、社会、经济、交通、能源、医疗等众多领域得到了广泛应用,成功地解决了生产、科研、管理中大量重要的问题。同时,也由经典的 $GM(1,1)$ 模型衍生出 $GM(1,N)$ 、 $GM(0,N)$ 、 $GM(2,1)$ 、 $GM(1,1)$ 幂模型等多种类型的灰色预测模型。预测类型也拓展到数列预测、区间预测、灰色灾变预测、波形预测、系统预测等。纵观该领域现有研究成果可以发现,目前,无论是理论研究还是应用研究,最活跃、最成熟的当属 $GM(1,1)$ 模型。因此,本书以 $GM(1,1)$ 模型为主要研究对象,对其建模机理进行深刻剖析,以提高模型精度、拓展模型适用范围为研究的出发点,在现有研究成果基础上,对灰色 $GM(1,1)$ 模型进行拓展,构建新的灰色预测模型,并对其进行优化及参数特性研究。在理论研究方面,目前已有众多学者对灰色 $GM(1,1)$ 预测模型进行了大量优化研究。从研究角度来看,主要可以分为如下几种类型:第一类是关于的灰色预测模型建模方法的研究。如王义闹提出了一种 $GM(1,1)$ 的直接建模方法,研

究表明该模型具有良好的几何形状吻合性^[26]。王东胜对 GM (1,1) 模型的预测机理进行了深刻分析,提出了去除累加序列的前几项的方法,来提高预测精度,取得了一定的效果^[27]。王宏对 GM (1,1) 模型的建模机理进行了深入分析,提出了改进的灰色 GM (1,1) 模型。遗憾的是,由于灰代数运算体系不完善,灰数运算问题还没有得到很好的解决,因此含有区间灰数的改进模型的应用性受到了限制^[28]。曹大有提出了一种改进的 GM (1,1) 模型,该方法突破了 GM (1,1) 对等时间距序列的限制,一定程度上拓展了模型的应用范围^[29]。熊岗、陈章潮等分析了灰色预测模型的缺陷,并给出了一种改进方法,提高了模型的精度^[30]。罗佑新提出了非等间距 GM (1,1) 模型与方法,该方法在一定程度上弥补了现有数据处理方法的不足,但对模型精度的改进效果仍不够显著^[31]。朱宝璋利用数理统计常用方法对 GM (1,1) 模型精度进行了深入分析,提出了残差均值修正模型和尾部序列 GM (1,1) 修正模型,提高了模型的精度^[32, 33]。黄福勇给出了寻找提高原始数据序列光滑度的变换途径。研究结果表明该方法预测效果较好^[34]。向跃霖建立了灰色摆动序列动态指数变换建模方法,并在环境噪音、化工污水排放量预测方面进行了实际应用。研究结果表明该方法计算简便,预测精度高^[35-40]。唐五湘在分析灰色建模机理的基础上,提出了一种估计 GM (1,1) 模型参数的新方法。该方法计算简单,同时适用于不等间距序列建模,但缺陷在于文中提出的检验方法适用于大样本数据类型,对灰色系统理论研究的小样本数据类型并不适用^[41]。何勇、鲍一丹,吴江明等人提出了一种随机型时间序列的预测新方法,特别适用于趋势随机型数据序列的预测问题,与传统方法相比,具有计算简单,精度高的特点^[42]。何斌、谢开贵等利用微分方程的一般差分格式对 GM (1,1) 模型进行推广,一定程度上简化了建模过程,缺陷在于利用回归分析原理对具有小样本数据要求的灰色 GM (1,1) 进行模型参数估计,同样缺乏

理论依据^[43]。谢开贵、何斌、谭界忠、杨万年等提出了一种灰色预测模型的新方法。该方法运用线性回归对数据进行分组,并对各组数据进行指数插值,运用二次规划进行权重选择,运用灰色灾变预测确定权重的时序集,从而求得预测值。这种方法提高了预测精度,拓广了灰色预测的范围^[44,45]。Yong-Huang Lin 和 Pin-Chan Lee 提出了一种修正灰色模型^[67], Hsu CC 和 Chen CY 等人提出了一种改进的灰色模型,并用于台湾电力需求的长期预测,取得了较好的预测效果^[68]。第二类是关于灰色预测模型建模初始值优化的研究。如徐涛、冷淑霞等对 GM (1,1) 模型的初始值进行了优化,一定程度提高了模型的建模精度^[46]。刘斌、刘思峰、翟振杰、党耀国等利用最小二乘法,以序列模拟值与真实值误差平方和最小为约束条件,求出了 GM (1,1) 模型初始值的优化参数,提高了模型的预测精度^[60]。党耀国、刘思峰、刘斌 $x_{(n)}^{(1)}$ 以为初始条件改进 GM (1,1) 模型,取得了良好的模拟和预测精度^[61]。第三类是关于灰色预测模型灰导数背景值的优化研究。如谭冠军从改变灰色建模方式的角度,重构了一类表达形式简洁、计算简单、适应性强的背景值计算公式,获得比较理想的拟合和预测精度,扩大了灰色 GM (1,1) 模型的适用范围^[47-49]。宋中民、同小军、肖新平根据灰色 GM (1,1) 模型的建模机理,指出了现行建立模型方法的不确切之处,给出了处理导数信号即背景值的新方法^[50]。宋中民在灰色 GM (1,1) 模型的建模机理上,给出了模型参数的优化方法,提高了模型的预测精度,为实际应用提供了新的方法^[51]。王义闹、李应川、陈绵云在 GM (1,1) 以均值生成作为灰导数背景值的基础上,进一步提出了一种逐步优化灰导数背景值的方法,提高了建模精度。王义闹、李万庆、王本玉、陈绵云在 GM (1,1) 以差商作为灰导数白化值的基础上,进一步提出了一种逐步优化灰导数白化值的方法,突破了发展系数的绝对值较大时不能用 GM (1,1) 建模的禁区,提高了建模精度^[52-58]。罗党、刘思峰、

党耀国对 GM (1,1) 模型的背景值进行了优化,显著提高了模型的精度,扩大其适用范围^[59]。张怡、魏勇、熊常伟等对 GM (1,1) 模型的背景值和初始条件同时优化,取得了建模方式上的创新,但在模型精度方面,还有待于进一步提高^[66]。王正新、党耀国等利用非齐次离散指数函数积分的角度构造了新的背景值求解公式,扩展了模型的适用范围,同时提高了模型的预测精度^[75]。第四类是关于离散灰色模型的研究。如谢乃明、刘思峰等提出了离散 GM (1,1) 模型及其优化拓展模型,对于具有近似齐次指数律的数据序列具有非常高的预测精度^[62-64]。姚天祥、刘思峰等在离散 GM (1,1) 模型的基础上,对其初始值进行了优化,进一步提高了模型的建模精度^[65]。第五类是将灰色预测模型与其他算法相结合的综合研究。如唐万梅、何文章等人将灰色预测模型与支持向量机、线性规划模型结合起来进行研究,取得了良好的效果^[69-71]。王文平、张岐山、肖新平对灰色预测模型进行了一系列研究,取得了丰富的研究成果^[72-74]。在应用研究方面,许多学者对灰色预测模型的性质及其在工业经济、证券投资、可靠性分析、汽油资源分析和其他学科方面展开了研究,并取得了较为丰硕的研究成果^[76-84]。上述研究对于完善灰色预测模型的建模精度,丰富灰色模型理论体系,以及拓展其应用范围作出了较大贡献。但纵观现有研究成果,我们发现,目前绝大部分灰色模型的研究成果均仅从模型建模参数的角度进行了优化研究,即对原模型进行不断地修正,以更好地拟合具有纯指数律特征的数据序列,却忽视了灰色 GM (1,1) 模型适用的数据序列类型的局限性。从灰色 GM (1,1) 模型的建模过程可知,它是一种基于累加生成灰指数律的最小二乘建模方式。该建模方式仅对具有近似齐次指数律特性的离散数据序列具有理想的拟合预测效果。同理,在 GM (1,1) 模型基础上改进、演变而来的系列优化灰色模型,以及离散灰色模型同样仅对具有白指数律的离散数据序列具有比较高的模拟预测效果。目