

# 电子信息装备试验 灰色系统理论运用技术

---

Application Technology of Grey System Theory  
for Electronic Information Equipment Test

■ 陈永光 柯宏发 著 ■



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 电子信息装备试验 灰色系统理论运用技术

Application Technology of Grey System Theory  
for Electronic Information Equipment Test

陈永光 柯宏发 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

电子信息装备试验灰色系统理论运用技术/陈永光,  
柯宏发著. —北京:国防工业出版社, 2008. 2

ISBN 978-7-118-05540-5

I. 电... II. ①陈... ②柯... III. 灰色系统 - 应用 - 电子  
系统: 信息系统 - 武器装备 - 武器试验 IV. TJ06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 204531 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850 × 1168 1/32 印张 12 1/8 字数 320 千字

2008 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3500 册 定价 46.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金**

**评审委员会**

# 国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镭

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参

(按姓氏笔画排序)

李德毅 杨星豪 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

本书主审委员 周一宇

# 前 言

电子信息装备是信息化战争最基本的要素,电子信息装备的试验与鉴定是其全寿命周期管理过程中的一个重要环节。通过试验,不仅可以分析评估电子信息装备在复杂电磁环境条件下完成作战使命的效能,而且可以发现其存在的缺陷隐患,从而保证其研制水平。因此,电子信息装备的试验技术水平直接关系到电子信息装备的作战能力、发展速度和水平,深入研究电子信息装备试验理论与技术,具有重大的军事意义。

在总结分析目前电子信息装备试验技术研究工作的基础上,本书试图阐述电子信息装备试验理论中的不确定性研究分支——灰色系统理论运用技术,其目的是为电子信息装备试验在信息不完全情况下的试验数据处理、试验方案优化选择、电子信息装备作战效能评估等有关问题的研究提供一种不确定性系统分析途径。

全书从结构上分为三大部分,共7章。

第一部分即第1章,从电子信息装备试验的定义与组成入手,分析了电子信息装备试验技术的国内外研究现状;简要介绍了不确定性信息理论和灰色系统理论;提出了电子信息装备试验中灰色系统理论运用技术的需求背景以及研究体系框架。

第二部分即第2章,介绍了灰色系统理论运用技术研究的重要基础——灰色数学方法,包括灰数、灰空间和序列等概念,灰色序列的整体生成,序列的规范化处理等。

第三部分包括第3章~第7章,是电子信息装备试验灰色系统理论运用技术的主体部分,也是作者近些年在该领域进行理论与应用基础研究的总结,电子信息装备试验中灰色系统理论运用技术的提出与这些基础研究有紧密的联系。

第3章主要提出了电子信息装备试验系统具有结构灰性、关系灰性、模型灰性、认知灰性等灰色特征,为利用灰色系统相关理论分析、解决电子信息装备试验中各种决策与评估问题提供了理论支撑。

第4章系统地介绍了灰色关联分析方法和权重系数的确定方法,研究了灰色关联序与优势分析方法在电子信息装备试验中的应用,通过对电子信息装备试验技术水平、作战效能的影响因素等进行系统优势分析,分清这些因素间的关系,从而抓住影响系统特性的主要矛盾、主要特征和主要关系。

第5章探讨了试验数据的灰色处理方法。提出了过失误差和系统误差的灰色判别方法;基于范数和灰色关联理论,提出了利用灰色距离信息方法(包括数据点的灰色距离信息量和数据样本空间的平均灰色距离信息量)来解决未知概率分布试验数据的处理问题;研究了数据点估计算法、数据处理结果不确定度的评定方法、样本数据及处理结果的接收和拒绝标准等。

第6章研究了电子信息装备试验中的灰色评估理论与应用。概述了电子信息装备试验中需要评估的问题,介绍了灰色统计评估和灰色聚类评估模型与算法,简要研究了灰色聚类评估方法的可靠性;建立了电子信息装备作战效能评估的灰色关联模型和加权灰色关联模型,对某三部短波通信干扰装备的作战效能进行了评估和讨论;对电子信息装备目标威胁能力评估的各种影响因素进行了分析,建立了一种多属性、多层次的威胁评估模型。

第7章研究了电子信息装备试验中的灰色决策理论与应用。具体研究了电子信息装备试验中的决策问题,介绍了灰色局势决策、灰色层次决策、灰色关联决策和灰色聚类决策等决策模型;提出了一种新的逼近于理想灰色关联投影的多目标决策算法,并提出了一种基于方案区分度的决策灵敏度分析方法。以电子信息装备试验方案的优选决策问题为例,建立了方案的灰色效果测度优选模型和灰色关联优选模型。另外,研究了电子信息装备试验中灰色整数线性规划和灰色整数非线性规划问题,建立了规划模型。

电子信息装备试验灰色系统理论运用技术是电子信息装备试验理论与技术研究中一种新的带有探索性的技术途径。灰色系统理论本身还在发展,还存在很多需要改进和深入研究的问题,但它为处理电子信息装备试验中不确定性信息提供了一种新的启发和学术思想。作者期望,本书的问世能为电子信息装备试验理论与应用研究开拓新的空间,挖掘更深的内涵,为电子信息装备试验理论的拓宽与发展贡献微薄的力量。

感谢国防科技图书出版基金的资助,感谢周一宇教授在本书出版中提供的热情帮助;感谢王国玉研究员,他认真审阅了书稿,提出了十分重要和宝贵的意见;感谢肖顺平教授、王雪松教授、李盾副教授、张文明副教授及曾勇虎博士、徐忠富博士、王伟博士、刘义博士等在学术上的交流和提出的宝贵意见。另外,本书的相关课题研究得到了灰色系统理论的创立者、英国《灰色系统学报》主编邓聚龙教授的指导与帮助;得到了国家有突出贡献的中青年专家、《系统与控制国际杂志》客座主编刘思峰教授的无私帮助;课题研究还得到了汪鸿雁、许宝民、李新科、李宏、张锡锬、苗少营、李应升等领导的大力支持;夏斌同志编写了附录程序;赵燕同志绘制了所有插图;石景岚、李雪蔷、满莹、张政超、张德欣等同志进行了文字校正工作;书中有一些材料参考了有关单位或个人发表的论文和书籍,在此一并深表谢意。

电子信息装备试验灰色系统理论运用技术作为电子战领域一个全新的研究方向,许多问题还有待于进一步探索,加之作者水平有限,虽经多方讨论、推敲和几易其稿,书中错误和短见之处在所难免,恳请读者和各方面专家不吝赐教。

作 者

2007 年 9 月

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                     | 1  |
| 1.1 电子信息装备试验技术               | 1  |
| 1.1.1 电子信息装备试验的定义与组成         | 1  |
| 1.1.2 电子信息装备试验技术的意义          | 3  |
| 1.1.3 电子信息装备试验与评估技术国内外研究现状   | 5  |
| 1.2 不确定性信息理论                 | 12 |
| 1.2.1 不确定性信息的概念              | 13 |
| 1.2.2 不确定性信息的分类与研究进展         | 13 |
| 1.2.3 各种不确定性信息的定义            | 14 |
| 1.2.4 不确定性信息处理技术的应用与比较       | 16 |
| 1.3 灰色系统理论                   | 18 |
| 1.3.1 灰色系统的概念                | 18 |
| 1.3.2 灰色系统理论的应用和发展           | 19 |
| 1.3.3 灰色系统的主要理论与任务           | 20 |
| 1.4 电子信息装备试验灰色系统理论运用技术体系     | 22 |
| 1.4.1 电子信息装备试验对灰色系统理论的应用需求   | 23 |
| 1.4.2 灰色系统理论在电子信息装备试验中的运用问题  | 24 |
| 1.4.3 电子信息装备试验灰色系统理论运用技术体系框架 | 26 |

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第2章 灰色数学方法基础 .....          | 31 |
| 2.1 灰色系统理论基本原理 .....        | 31 |
| 2.1.1 默承认与默否认原理 .....       | 31 |
| 2.1.2 信息认知原理与差异信息原理 .....   | 32 |
| 2.1.3 解的非唯一性原理 .....        | 34 |
| 2.1.4 白化原理 .....            | 34 |
| 2.1.5 最少信息原理 .....          | 35 |
| 2.2 灰数及其运算 .....            | 36 |
| 2.2.1 灰数、灰元与灰关系 .....       | 36 |
| 2.2.2 灰数的白化函数 .....         | 38 |
| 2.2.3 灰数的覆盖运算 .....         | 43 |
| 2.2.4 数与灰数的混合运算 .....       | 50 |
| 2.2.5 灰色系统方程 .....          | 54 |
| 2.2.6 灰色矩阵及其运算 .....        | 55 |
| 2.3 灰朦胧集 .....              | 57 |
| 2.3.1 灰朦胧集的定义 .....         | 57 |
| 2.3.2 灰朦胧集与经典集合的区别 .....    | 58 |
| 2.4 灰色序列及其整体生成 .....        | 58 |
| 2.4.1 序列的定义与类型 .....        | 58 |
| 2.4.2 序列算子 .....            | 59 |
| 2.4.3 序列的光滑性 .....          | 60 |
| 2.4.4 序列的级比与光滑比 .....       | 62 |
| 2.4.5 序列的规范化处理 .....        | 63 |
| 2.4.6 灰色生成的定义与作用 .....      | 64 |
| 2.4.7 灰色累加生成 .....          | 65 |
| 2.4.8 灰色累减生成 .....          | 66 |
| 第3章 电子信息装备试验系统的灰色特性分析 ..... | 68 |
| 3.1 电子信息装备试验系统 .....        | 68 |

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 3.1.1 | 系统的概念与分类 .....           | 68  |
| 3.1.2 | 电子信息装备试验系统的内涵与外延 .....   | 70  |
| 3.1.3 | 电子信息装备试验系统的系统特性 .....    | 71  |
| 3.2   | 电子信息装备试验中的不确定性信息分析 ..... | 74  |
| 3.2.1 | 不确定性信息的来源 .....          | 74  |
| 3.2.2 | 不确定性信息处理技术框架 .....       | 79  |
| 3.3   | 电子信息装备试验系统的系统特性 .....    | 79  |
| 3.3.1 | 传统意义下的电子信息装备试验系统 .....   | 80  |
| 3.3.2 | 电子信息装备试验系统的灰色特性 .....    | 81  |
| 第4章   | 电子信息装备试验数据的灰色关联分析 .....  | 86  |
| 4.1   | 灰色关联分析 .....             | 87  |
| 4.1.1 | 距离空间 .....               | 87  |
| 4.1.2 | 灰色关联空间 .....             | 90  |
| 4.1.3 | 灰色关联分析模型 .....           | 91  |
| 4.1.4 | 灰色关联度的性质 .....           | 93  |
| 4.1.5 | 关于分辨系数的讨论 .....          | 95  |
| 4.2   | 其他灰色关联分析模型 .....         | 98  |
| 4.2.1 | 加权灰色关联分析模型 .....         | 98  |
| 4.2.2 | 其他几种灰色关联度 .....          | 99  |
| 4.2.3 | 灰色关联矩阵与灰色自关联矩阵 .....     | 105 |
| 4.3   | 灰色关联分析应用 .....           | 106 |
| 4.3.1 | 灰色关联序与优势分析 .....         | 106 |
| 4.3.2 | 评价指标的灰色聚类 .....          | 109 |
| 4.3.3 | 试验技术水平的影响因素分析 .....      | 112 |
| 4.3.4 | 制约电子信息装备作战效能的原因剖析 .....  | 116 |
| 4.3.5 | 试验质量的影响因素分析 .....        | 121 |
| 4.4   | 权重系数的确定方法 .....          | 124 |
| 4.4.1 | 层次分析法 .....              | 124 |
| 4.4.2 | 白化权函数法 .....             | 131 |

|       |                                     |     |
|-------|-------------------------------------|-----|
| 4.4.3 | 指标权重的系统分析方法 .....                   | 132 |
| 4.4.4 | 基于灰色关联度的确定方法 .....                  | 135 |
| 4.4.5 | 基于灰色自关联矩阵的确定方法 .....                | 136 |
| 4.4.6 | 基于区间灰数的确定方法 .....                   | 137 |
| 第5章   | 电子信息装备试验数据的灰色处理 .....               | 140 |
| 5.1   | 试验数据及其分类 .....                      | 141 |
| 5.1.1 | 试验信息与试验数据 .....                     | 141 |
| 5.1.2 | 电子信息装备试验数据的特点 .....                 | 142 |
| 5.1.3 | 电子信息装备试验数据分类 .....                  | 144 |
| 5.1.4 | 试验数据的度量 .....                       | 147 |
| 5.1.5 | 试验数据处理的一般流程 .....                   | 148 |
| 5.2   | 测量误差 .....                          | 149 |
| 5.2.1 | 测量误差的概念 .....                       | 149 |
| 5.2.2 | 测量误差的来源 .....                       | 150 |
| 5.2.3 | 测量误差的分类 .....                       | 150 |
| 5.2.4 | 精度分析 .....                          | 151 |
| 5.3   | 试验数据的灰色建模 .....                     | 152 |
| 5.3.1 | 数学模型的分类与建模步骤 .....                  | 152 |
| 5.3.2 | GM(1,1)模型 .....                     | 154 |
| 5.3.3 | 残差 GM(1,1)模型 .....                  | 158 |
| 5.3.4 | GM(1,1)模型群 .....                    | 161 |
| 5.3.5 | 非线性微分动态 GM 模型(Verhulst<br>模型) ..... | 166 |
| 5.3.6 | 电子信息装备试验中的 GM(1,1)模型<br>预测 .....    | 169 |
| 5.4   | 试验数据序列的误差分析 .....                   | 178 |
| 5.4.1 | 过失(粗大)误差的灰色包络判别法 .....              | 178 |
| 5.4.2 | 过失误差的 GM(1,1)模型外推判别法 .....          | 180 |
| 5.4.3 | 系统误差的判别 .....                       | 182 |

|       |                             |     |
|-------|-----------------------------|-----|
| 5.4.4 | 误差判别算例 .....                | 184 |
| 5.4.5 | 关于 GM(1,1) 模型外推判别法的讨论 ..... | 187 |
| 5.5   | 试验数据序列的灰色距离信息模型 .....       | 189 |
| 5.5.1 | 基于灰色系统理论与范数的灰色距离 .....      | 189 |
| 5.5.2 | 灰色距离信息量定义与性质 .....          | 190 |
| 5.5.3 | 平均灰色距离信息量定义与性质 .....        | 192 |
| 5.6   | 试验数据序列的参数点估计 .....          | 194 |
| 5.6.1 | 参数的点估计 .....                | 194 |
| 5.6.2 | 不确定度评定 .....                | 195 |
| 5.6.3 | 信息白化率的概念 .....              | 197 |
| 5.6.4 | 数据序列及估计结果接收与拒绝标准 .....      | 198 |
| 5.7   | 试验数据序列空穴的插值方法 .....         | 198 |
| 5.7.1 | 均值法 .....                   | 199 |
| 5.7.2 | 级比法 .....                   | 200 |
| 5.7.3 | 灰色关联量方法 .....               | 201 |
| 5.7.4 | 灰色距离信息量方法 .....             | 202 |
| 5.7.5 | 多个空穴的 GM(1,1) 模型法 .....     | 203 |
| 5.7.6 | 空穴的插值算例 .....               | 204 |
| 5.8   | 试验数据序列的灰色处理步骤与算例 .....      | 205 |
| 5.8.1 | 试验数据的灰色处理步骤 .....           | 205 |
| 5.8.2 | 算例与分析 .....                 | 205 |
| 第 6 章 | 电子信息装备试验中的灰色评估 .....        | 208 |
| 6.1   | 试验中的评估问题概述 .....            | 208 |
| 6.1.1 | 灰色评估问题 .....                | 208 |
| 6.1.2 | 试验中的评估问题 .....              | 211 |
| 6.2   | 灰色统计评估 .....                | 212 |
| 6.2.1 | 基本概念与算式 .....               | 212 |
| 6.2.2 | 灰色统计评估仿真示例 .....            | 213 |
| 6.3   | 灰色聚类评估 .....                | 217 |

|       |                           |     |
|-------|---------------------------|-----|
| 6.3.1 | 聚类与灰色聚类的基本概念 .....        | 217 |
| 6.3.2 | 灰色关联聚类评估 .....            | 218 |
| 6.3.3 | 灰色变权聚类评估 .....            | 219 |
| 6.3.4 | 灰色定权(和等权)聚类评估 .....       | 221 |
| 6.3.5 | 基于三角白化权函数的灰色聚类评估 .....    | 222 |
| 6.3.6 | 灰色聚类评估的可靠性分析 .....        | 224 |
| 6.4   | 试验配试目标威胁水平的灰色关联评估模型 ..... | 226 |
| 6.4.1 | 威胁评估过程 .....              | 227 |
| 6.4.2 | 干扰目标的威胁评估模型 .....         | 228 |
| 6.4.3 | 干扰目标的威胁评估算法 .....         | 230 |
| 6.4.4 | 战场场景想定下的仿真 .....          | 235 |
| 6.5   | 电子信息装备作战效能的灰色评估 .....     | 237 |
| 6.5.1 | 关于作战效能评估 .....            | 237 |
| 6.5.2 | 电子信息装备作战效能评估的重要意义 .....   | 239 |
| 6.5.3 | 电子信息装备作战效能评估途径 .....      | 241 |
| 6.5.4 | 基于灰色关联分析的作战效能评估 .....     | 242 |
| 6.5.5 | 基于灰色变权聚类的作战效能评估 .....     | 248 |
| 6.5.6 | 灰色层次评估模型 .....            | 251 |
| 第7章   | 电子信息装备试验中的灰色决策 .....      | 256 |
| 7.1   | 试验中的决策问题 .....            | 258 |
| 7.2   | 灰色局势决策 .....              | 260 |
| 7.2.1 | 效果测度变换 .....              | 260 |
| 7.2.2 | 灰色局势决策模型与步骤 .....         | 263 |
| 7.3   | 灰色层次决策 .....              | 264 |
| 7.3.1 | 灰色层次决策的概念 .....           | 264 |
| 7.3.2 | 灰色层次决策模型与步骤 .....         | 264 |
| 7.3.3 | 灰色层次决策示例 .....            | 267 |
| 7.4   | 灰靶决策 .....                | 270 |
| 7.4.1 | 基于靶心度分析的决策模型 .....        | 270 |

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 7.4.2 | 基于贡献度分析的决策模型 .....       | 272 |
| 7.4.3 | 区间灰量的关联度决策模型 .....       | 273 |
| 7.5   | 灰色聚类决策 .....             | 277 |
| 7.5.1 | 灰色统计聚类决策 .....           | 277 |
| 7.5.2 | 灰色层次聚类决策 .....           | 280 |
| 7.5.3 | 通信系统的灰色聚类决策示例 .....      | 280 |
| 7.6   | 基于逼近于理想灰色关联投影的决策模型 ..... | 286 |
| 7.6.1 | 逼近于理想灰色关联投影算法原理 .....    | 287 |
| 7.6.2 | 决策灵敏度分析 .....            | 294 |
| 7.6.3 | 决策的基本步骤 .....            | 295 |
| 7.6.4 | 决策评估举例与分析 .....          | 296 |
| 7.7   | 电子信息装备试验方案的灰色优选模型 .....  | 299 |
| 7.7.1 | 问题描述 .....               | 300 |
| 7.7.2 | 灰靶决策优选模型及算法 .....        | 301 |
| 7.7.3 | 灰色关联优选模型及算法 .....        | 304 |
| 7.7.4 | 仿真算例 .....               | 306 |
| 7.8   | 电子信息装备试验中若干决策问题 .....    | 307 |
| 7.8.1 | 试验阵地的选择问题 .....          | 307 |
| 7.8.2 | 配试设备的选择问题 .....          | 310 |
| 7.8.3 | 电子信息装备训练模式的优选 .....      | 311 |
| 7.9   | 灰色整数线性规划和非线性规划 .....     | 316 |
| 7.9.1 | 灰色整数规划 .....             | 317 |
| 7.9.2 | 灰色 0-1 规划 .....          | 318 |
| 7.9.3 | 电子信息装备的配置问题 .....        | 319 |
| 7.9.4 | 电子信息装备的灰色分配模型 .....      | 323 |
| 7.9.5 | 装备的最佳备件数问题 .....         | 334 |
| 7.9.6 | 电子侦察装备的地域分配问题 .....      | 336 |
| 附录 A  | 最小二乘法 .....              | 339 |
| 附录 B  | 几个主要计算机程序 .....          | 344 |

|                 |     |
|-----------------|-----|
| 图表索引 .....      | 359 |
| 相关术语中英文对照 ..... | 363 |
| 参考文献 .....      | 369 |