煤矿安全数学分析与预测

MEIKUANGANQUAN SHUXUEFENXIYUYUCE

煤炭工业出版社

煤矿安全数学分析与预测

秦书玉　张永吉　田利军　王瑞云　著

煤 炭 工 业 出 版 社

·北　京·

图书在版编目（CIP）数据

煤矿安全数学分析与预测 / 秦书玉等著 .—北京：煤炭工业出版社，2003

ISBN 7-5020-2276-7

Ⅰ.煤… Ⅱ.秦… Ⅲ.①数学分析—应用—煤矿—矿山安全②数学预测—应用—煤矿—矿山安全

Ⅳ.TD7-05

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2003）第 013260 号

煤矿安全数学分析与预测

秦书玉　张永吉　田利军　王瑞云　著

责任编辑：黄 朝 阳

*

煤炭工业出版社　出版发行

（北京市朝阳区芍药居 35 号　100029）

北京房山宏伟印刷厂　印刷

*

开本 850mm×1168mm $^{1}/_{32}$　印张 $10^{3}/_{8}$

字数 270 千字　印数 1—850

2003 年 5 月第 1 版　2003 年 5 月第 1 次印刷

社内编号 5048　定价 28.00 元

内 容 提 要

本书在简明、通俗地介绍了灰色关联分析、层次分析、数值分析、模糊聚类分析、事故树分析和神经网络分析等有关基础知识的同时，着重讲述了运用这些数学方法对煤矿井下煤炭自燃、瓦斯涌出、煤与瓦斯突出、矿井涌水、顶板冒顶等灾害事故进行分析和预测及对矿井通风系统的评价。为加强学术交流，书中还介绍了在该领域中部分有争议的各种学术观点。

本书可供从事煤矿安全的工程技术人员及企业管理人员使用，也可作为大专院校师生的教学参考书。

前　言

目前，我国煤矿生产仍以井工矿为主。在井下十分复杂的开采条件下，煤炭自燃、煤与瓦斯突出、矿井涌水、矿山压力（围岩塌落）以及煤尘与瓦斯爆炸等各种自然灾害严重威胁着煤矿安全生产，造成的煤矿企业经济损失和重大的人身伤亡事故触目惊心。要从根本上实现煤矿安全生产和提高企业经济效益及社会效益，必须正确、科学地分析、评价和预测井下各种自然灾害的发生、发展和危害程度。作为煤矿科学技术研究的一项重要任务，多年我国煤炭战线广大工程技术人员和职工对此进行了卓有成效地研究，取得了重大进展，为保证煤矿安全生产起到了积极的作用。

作者是根据本人及同行近十余年来运用数学方法解决煤矿安全问题所取得的科研成果和实践经验撰写本书。本书从数学安全分析理论和实际应用两个方面进行了较系统地论述，目的是促进此方面的成果在煤矿安全生产上的推广和应用，加强此方面的研究，为我国煤炭工业安全、高效、快速的生产服务。

本书共分八章，通俗地介绍了有关数学方法的基本知识及应用。各章的第 1 节均由秦伟瀚同志撰写，全书由辽宁工程技术大学孙宝铮教授审阅。在撰写的过程中得到了黑龙江省安全监察局总工程师赵书田教授级高工、吉林省安全监察局副局长王国军高工、阜新煤矿集团总公司总工程师孟庆坤高工、通化矿务局总工程师于文波高工、辽宁工程技术大学马云东教授、海国治教授等专家、学者的支持和指教，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，谨怀感激之情欢迎读者不吝赐教，批评指正。

作　者
2002年9月3日
于阜新

目　录

第1章　煤矿安全灰色关联分析

1.1　灰色系统理论基础知识

1.1.1　系统与系统论

所谓系统即是由若干个相互作用、相互依赖的组成部分构成的具有特定功能的整体。任何1个系统，总包含着若干个子系统，同时又被别的系统所包围。如气候系统包含着大气、海洋、陆地、冰雪圈和生物圈5个子系统，其外系统为太阳系。太阳系可视为1个系统，是由9大行星和一些小行星组成，其外系统是宇宙空间。子系统的功能和子系统间的关系决定着系统的总性能。由于系统受外系统的强迫作用，因此，任何系统总是处在受本身规律支配和受环境影响的动态平衡之中。

1个系统必须具有以下特征：

(1) 集合性：系统不是1个单体，而是1个集合体、综合体。

(2) 相关性：构成系统的每个组成部分都是相互联系、相互依存、相互制约的；而且前后左右相关，有一定的秩序，形成一个完整的过程。

(3) 目的性和可控性：系统可分为自然存在的和人为的两种。动物作为自然系统，其行为显然有目的性。凡人为的系统，均有明确的目的性。人为的系统一般都是可控制的系统，如水力系统的目的是发电等。

(4) 层次性：系统是有层次的，主系统包括若干子系统，而主系统本身又被含在更大的系统之中。

(5) 环境适应性：系统必须适应环境，如发动机必须能在大气中得到冷却以散热。

系统论是研究对所有系统普遍适用的原理的学科，它运用完整性、集中性、层次结构、逻辑同构等概念，以此找出适用于一切系统的模式、原则和规律。

系统观念、系统方法之所以能由定性转化为定量，由经验转化为科学，并上升到科学的理论即系统论，是40年以来现代科学技术发展的结果，是现代管理科学、科学学和系统工程学等许多科学的出现为其提供了理论基础。系统论运用的数学有运筹学(线性规划、对策论、图论和算法论等)、模糊数学等，尤其是计算机的出现，为运用系统论的思想、方法，解决各种现实问题提供了强有力的计算工具。

系统方法处理的问题一般是复杂系统，变量多、随机性强、非线性问题多，计算量大。

1.1.2 灰色系统及其理论

所谓灰色系统是既含有已知信息又含有未知信息的系统。信息完全未确知的系统为黑色系统；信息完全确知的系统为白色系统。灰色系统是黑箱概念的一种推广。黑色、灰色和白色是相对概念，没有绝对。

灰色系统具有以下特点：

(1) 用灰色数学来处理不确定量，能使之量化。

(2) 能充分利用已知信息寻求系统的运动规律。

(3) 灰色系统理论能处理贫信息系统，即能处理只有少量观测数据的系统。

灰色系统理论大致包括以下8个方面的内容：

(1) 灰色系统的数学问题。

(2) 灰色因素的相关分析。

(3) 灰色建模。

(4) 灰色预测。

(5) 灰色决策和规划。

(6) 灰色系统分析。

(7) 灰色系统控制。

(8) 灰色系统优化。

灰色系统理论所以能揭示系统的某些长远的运动规律，是因为系统作为复杂的多层次的子系统的集合，若局限在某一层次考察问题，而其它层次（内外层）相对稳定时，反映此层次变化规律的量是确定的，或者说是白的；若其它层次不稳定时，就会观测到某些不确定量，它是其它层次对该层次作用的结果。这些不确定量不能确切地体现该层次的变化规律。若在较高层次考察时，所观测到这些不确定量又变为在较高层次可确的量，体现了较高层的某种变化规律。灰色系统理论认为低层次系统的不确量是高层次系统的相对稳定量，应充分利用这类稳定的信息寻求系统发展变化的规律。

1.1.3 灰色概念的度量与灰数

概念是人对具体事物的一种抽象。概念的形成过程可分两类，一是内涵不确定概念，另一类是外延不确定概念。符合某个概念的那些对象的全体，称为概念的外延。概念的内涵是指规定这一概念的若干本质属性。

根据内涵和外延的确定或不确定性，概念分为：

(1) 白色概念——内涵、外延均可确定的概念，如“煤”等。

(2) 灰色概念——外延确定，内涵不确定的概念，如“人体”等。

(3) 模糊概念——内涵确定，外延不确定的概念，如“年轻”等。

(4) 灰色模糊概念——内涵和外延均不确定的概念。

灰色概念是普遍存在的。如“人体”概念，当给出一个具体对象，可以判断是否属于“人体”，对“人体”的本质属性，即内涵却有一个知少到多的认识深化过程。灰色概念与模糊概念的区别在于灰色概念着眼于内涵，模糊概念着眼于外延。如“年青人”概念内涵明确，外延不明确。当给定一个具体人时，如 30 岁，难以判断是不是“年青人”。

一个灰色概念可表征为

$$X=\{(\alpha,\ \beta)_u|_{u\in U}\}$$

其中，U 表示这个灰色概念的内涵所包括的所有层次的集合；α 为 u 层次中的已知因素集，β 为 u 层次中的未知因素集。对某个确定的 u 层次，总的元素是一定的。若 α 中的元素越多，则 β 中的元素越少，反之亦然。若 α 是一个空集，那么 X 在 u 层上是“黑”的；反之，若 β 是空集，那么 X 在 u 层上就是“白”的。因此，可由 α 和 β 的比值求出 X 在 u 层上的灰色度。

设 $X(\alpha,\ \beta)_u$ 为在 u（$u\in U$）层上讨论的灰色概念，则映射

$$N:\ \{X(\alpha,\ \beta)_u|_{u\in U}\}\rightarrow[0,\ 1]$$

称为灰色度。若它满足

$$\left.\begin{array}{ll}(1)\ N(X(\alpha,\ \beta)_u)=0.5, & \text{当}\ \alpha=\beta\\ (2)\ N(X(\alpha,\ \beta)_u)=1, & \text{当}\ \alpha=0\\ (3)\ N(X(\alpha,\ \beta)_u)=0, & \text{当}\ \beta=0\\ (4)\ 0\leqslant N(X(\alpha,\ \beta)_u)<0.5, & \text{当}\ \alpha>\beta\\ (5)\ 0.5\leqslant N(X(\alpha,\ \beta)_u)\leqslant 1, & \text{当}\ \alpha<\beta\end{array}\right\}\qquad(1-1)$$

令

$$N=1-\left[0.5+\frac{1}{2}(\alpha^*-\beta^*)\right]\qquad(1-2)$$

式中，$\alpha^*=\dfrac{\alpha}{\alpha+\beta}$，$\beta^*=\dfrac{\beta}{\alpha+\beta}$，$\alpha^*+\beta^*=1$，即将 α，β 归一化处理。α 和 β 分别是已知和未知因素集中的元素个数，容易证明 N 满足（1－1）式。

当 $N=1$ 时，必须有 $0.5+\frac{1}{2}(\alpha^*-\beta^*)=0$，这时 $\alpha=0$，表明 u 层次中全是未知因素集，灰度达最大值，即“纯黑”；当 $N=0$ 时，必须有 $\left[0.5+\frac{1}{2}(\alpha^*-\beta^*)\right]=1$，这时 $\beta=0$，表明 u 层次中全是已知因素集，灰度最小，即“纯白”；当 $N=0.5$

时，必定有$\left[0.5+\frac{1}{2}(\alpha^{*}-\beta^{*})\right]=0.5$，此时$\alpha=\beta$，表明$u$层次中已知因素集等于未知因素集，灰度适中。当$N>0.5$或$N<0.5$时，表明$\beta>\alpha$或$\alpha>\beta$，即灰度较大或较小。因此，$N$是度量灰色概念的一个量。

所谓灰数即未明确指定的数，也就是处在某一范围内的数，用希腊字母θ表示。采用下列一些记号，即

$\underline{a}=\inf a$ 指灰数以$\underline{a}$为最大下界（下确界）；

$\overline{a}=\sup a$ 指灰数以$\overline{a}$为最小上界（上确界）；

$\overline{\theta}$表示一般灰数θ的白化值；

$\theta(a)$指以a为白化值的灰数；

若$\underline{a}=-\infty$，$\overline{a}=+\infty$，则称$\theta(x)(x\in a)$为黑数；

若$\underline{a}=\overline{a}=$确定值，则称$a$为白数；

若$\underline{a}$与$\overline{a}$全确定或一个确定，另一个为无穷大，称a为灰数，灰数所属范围叫灰域。如正常人的视力是个灰数，它的灰数是几厘米到几公里范围。

灰数有以下几类：

(1) 有下界与无上界的灰数，记为：$\theta\in[\underline{a},\infty]$或$\theta(\underline{a})$。其中$\underline{a}$为$\theta(\underline{a})$的下确界，此时$\underline{a}$为白数，即一般的数。称$[\underline{a},\infty]$为灰数$\theta$的取数域。如物体温度是个灰数，可表示为$\theta\in[-273,\infty]$。

(2) 有上界而无下界的灰数，记为：$\theta\in[\infty,\overline{a}]$或$(\overline{a})$。其中$\overline{a}$为灰数的上确界。如一个国家的财政赤字其上界为零，是上确界的灰数。

(3) 区间灰数。具有上确界$\overline{a}$和下确界$\underline{a}$的灰数称为区间灰数，记为：$\theta\in[\underline{a},\overline{a}]$。

如某地的气温变化在-10℃至39℃之间，就是区间灰数，$\underline{a}=-10$，$\overline{a}=39$。

(4) 本征灰数与非本征灰数。本征灰数是指永远不能或暂时还不能找到一个白数作为灰数的“代表”的数。如宇宙的总能量

是本征灰数。

非本征灰数是指凭某种手段能找到一个白数作为“代表”的灰数。把这个白数称为灰数的白化值。灰数 θ（a）的白化值，记为 $\bar{\theta}$（a）$=a$，若白化值为零，称为灰数的零化值，记为 $\bar{\theta}$（a）$=0$。

灰平面是指预测值可能达到的范围。当预测值离现在时刻 t_0 愈远，其精度愈粗，范围越大。记预测上界为 $\hat{x}_{max}$（t），预测下界为 $\hat{x}_{min}$（t），简单地以直线来表示 $\hat{x}_{max}$（t）与 $\hat{x}_{min}$（t），所夹之范围称之为灰平面，如图 1－1 所示。当灰平面蜕化为一点时称为灰靶。从几何角度来说，灰平面是二维灰域，而某一灰数则是一维灰区间。

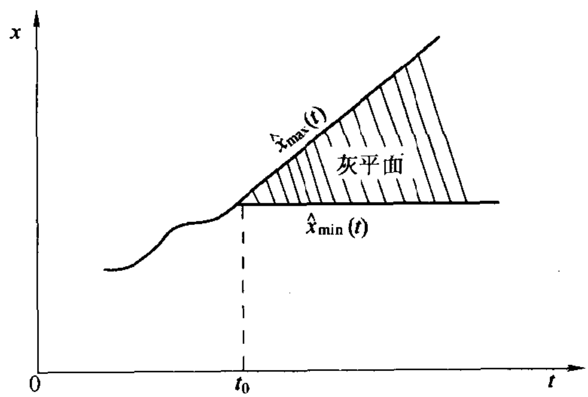

图 1－1　灰平面

t_0—表示现在；$t>t_0$—表示将来；$t<t_0$—表示过去

1.1.4　灰代数方程、灰矩阵与灰微分方程

1.1.4.1　灰代数方程

含灰元的代数方程称之灰代数方程，如

$$\theta x+b=0 \tag{1-3}$$

其解取决于 θ 的取值，若灰元 θ 在有界灰域内取离散值，则 x 有有限个离散解，（1－3）式代表有限个方程；若 θ 在灰域内连

续取值，则（1－3）式代表无穷多个方程，有无穷多个解。严格地说，灰方程不是一个方程，而是许多方程的代表符号。

含一个灰元的一元一次灰方程，它的解是一维区间。如

$$\theta x + 12 = 0$$

当 $\theta=2$，3，4 时，$x=-6$，-4，-3，即 x 的解是一个集合 $\{-6, -4, -3\}$。当 θ 在 [2，4] 中连续取值时，x 也在闭区间 [－6，－3] 内连续取值，即 x 的解布满整个区间。

显然，$x+b=0$ 方程，若按灰色理论的观点来看，它是一个不含灰元的方程，故称白方程，其解 $x=-b$ 是实数轴上的一个点。

1.1.4.2 灰矩阵

含有灰元的矩阵称灰矩阵，则有

$$A=\begin{bmatrix} 1 & \theta_{12} & 9 \\ 3 & \theta_{22} & \theta_{23} \\ 2 & 7 & 1 \end{bmatrix} \tag{1-4}$$

其矩阵的一般形式为

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

其简式为 $A_{m\times n}$，即由 m 行，n 列个数排列的表，记为

$$A=(a_{ij})_{m\times n}$$

A 中有 $m\times n$ 个元素，若其中有 N_y 个灰元素，则定义 A 的灰度为矩阵中灰元个数与矩阵元素之比，即

$$d_y \doteq \frac{N_y}{m\times n}$$

灰矩阵的白度定义为

$$d_w = 1-\frac{N_y}{m\times n}$$

（1－4）式中矩阵 A 的灰度为