

灰色系统理论及其应用

第三版

刘思峰 党耀国 方志耕 等 著

中国科学院科学出版基金

国家教育部博士学科点科研基金

江苏省自然科学基金(重点)

南京航空航天大学特聘教授和创新群体科研基金资助项目

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书全面、系统地论述了灰色系统的基本理论、基本方法和应用技术,是作者长期从事灰色系统理论探索、实际应用和教学工作的结晶,同时还吸收了国内外同行近年来取得的理论和应用研究新成果,向读者展示出灰色系统理论这一新学科的概貌以及发展动态。

全书共 14 章,包括灰色系统的基本概念与基本原理、灰色方程与灰色矩阵、序列算子与灰色序列生成、灰色关联分析、灰色聚类评估、灰色系统建模、灰色系统预测、灰色组合模型、灰色决策、灰色规划、灰色投入产出、灰矩阵博弈模型和灰色控制等内容,并附有灰色建模系统软件包。其中序列算子、缓冲算子公理系统及系列弱化和强化算子、灰数灰度测度公理、广义灰色关联度(灰色绝对关联度、灰色相对关联度、灰色综合关联度)、定权灰色聚类评估和基于三角白化权函数的灰评估新方法、LPGP 漂移与定位求解、GM(1,1)模型的适用范围以及灰色经济计量学模型(G-E)、灰色生产函数模型(G-C-D)、灰色投入产出模型(G-I-O)、灰色马尔可夫模型(G-M)和灰色博弈模型(G-G)等系作者首次提出。

本书适于作高等院校理、工、农、医、天、地、生及经济、管理类各专业大学生和研究生教材,亦可供政府部门、科研机构及企事业单位的科技工作者、管理干部以及系统分析、市场预测、金融决策、资产评估、企业策划人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

灰色系统理论及其应用/刘思峰,党耀国,方志耕等著. —3 版.

—北京:科学出版社,2004

ISBN 7-03-013351-X

I. 灰… II. ①刘…②党…③方… III. 灰色系统理论—研究
IV. N941.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 043496 号

责任编辑:马长芳 李淑兰 / 责任校对:李奕莹

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1991 年 5 月 第 一 版 开本:B5(720×1000)

1999 年 6 月 第 二 版 印张:25

2004 年 11 月 第 三 版 字数:475 000

2005 年 6 月 第六次印刷 印数:14 001—16 000

定价:40.00 元(含盘)

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

第三版序一

——CYBERNETICS AND SYSTEMS, FROM PAST TO FUTURE

FOUNDERS AND PRECURSORS

We consider as founders those who introduced the modern meaning of cybernetics or systems.

As far as cybernetics is concerned the most eminent are Norbert Wiener (1894—1964) and Warren Sturgis McCulloch (1898—1969). The importance of the new field which was to become cybernetics was recognized in 1943 by Wiener, McCulloch, John von Neumann and other members of the so-called “Teleological Society” placed under the aegis of the Macy Foundation. But the official birth of cybernetics can be dated of the publication of Wiener’s book “Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine” published in 1948 by Hermann (Paris), The Technology Press and Wiley. But the role of McCulloch is not to be underestimated. It started in 1943 with the publication, with W. Pitts, of an article about “A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity”.

In the field of systems a name is predominant, that of Ludwig von Bertalanffy (Vienna 1901, USA 1972). He introduced his concept of general systems theory (which he had foreseen in the 20’s) in 1945 in an article published in a philosophical journal and entitled “Zu einer allgemeinen Systemlehre”. The German title shows that his purpose was a general theory of systems as exemplified in his “General System Theory” (1968).

It is usual to consider, in a way, Plato as a precursor because he used the word “kybernetike”, in “The Republic” or “Gorgias”, as a political metaphor of the art of steering as well as A.-M. Ampère in his “Essai sur la philosophie des sciences” (1843) who used the word “cyberétique” and Trentowski in “Philosophy and Cybernetics or the Art of Governing a Country” (in Polish) who used the word “kibernetiki”. Romanian precursors are S. Odobleja (1939) And P. Postelnicu (1947). For systems a precursor is A. Bogdanov with “Tektologia” (1912, in Russian).

Coming back to cybernetics other precursors have been proposed: G.W. Leibniz and R. Descartes. For Wiener Leibniz may be seen as a patron saint of cybernetics for

his attempt to build a general logic with a universal notation (“characteristica universalis”) making possible “the computation of thoughts” (“calculus ratiocinator”) presented in his “Dissertatio de arte combinatoria” (1666). Closer to modern realizations was his computer, better than that of Pascal (built before Leibniz’s birth). According to McCulloch, cybernetics started with Descartes. His first argument is that, in the treaty of Descartes entitled “L’ Homme” (1664), there is the “first use of the notion of inverse feedback and of the reflex” in a description of how a man, having his foot very close to a fire, removes it from it. A second argument is to be found in “La Dioptrique” (1637) where McCulloch sees what is “probably the first coding theorem” when Descartes says that the images on the retina are transmitted to the brain by signals having no similarity with what they represent.

BASIC CONCEPTS

Two important concepts of cybernetics are, according to the title of Wiener’s book, control and communication. Negative feedback depends upon both of them. It has been used to regulate clepsydras water supply, rotation speed of wind mills, that of a steam engine with its Watt’s governor. The controllability of a system, that is to say the possibility to bring it from one state to another involves a generalization of negative feedback studied by R.E. Kalman and the optimality of this process considered by R.E. Bellman and also by L. Pontryagin.

Communication or more precisely signal theory, already present in feedback, has a specific interest recognized by Wiener in “Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series” (1949) where he solves the problem of optimum prediction and elimination of noise after Kolmogoroff but quite independently. Another aspect of communication, also fundamental according to Wiener, is the notion of quantity of information, proposed by C.E. Shannon in his “Mathematical Theory of Communication” (1949) and foreseen by H. Nyquist, R. Hartley and in a way by J. von Neumann. The quantity of information has no semantic meaning, it is an index of the degree of unexpectedness of a message carried by a signal. In short the quantity of information of a message of probability p is $-\log p$ where \log means the logarithm with basis 2. So it is equal to infinity when the message is completely unexpected ($p=0$) and to zero when the message is already known ($p=1$). The case of $p=1/2$ corresponds to the unit of quantity of information (bit or Hartley). More generally the mean value of the quantity of information corresponding to a message telling which of n possible issues has really occurred is formally the same as the entropy of a statistical system with n possible states, at least up to a factor involving Boltzmann’s

constant. Shannon used the concept of quantity of information in his study of the transmission capacity of a channel. The formal analogy between quantity of information and entropy has aroused the interest of L. Szilard (1925), B. Mandelbrot (1953) who proposed elucidations of the so-called Maxwell's demon paradox and also of L. Brillouin (1956) who built a theory of measurement in physics. These attempts were considered promising by L. de Broglie, but they are still controversial.

Another interesting idea of cybernetics is that of requisite variety proposed by W.R. Ashby in "An Introduction to Cybernetics" (1956). It has to do with both games and information theories and has been used in a precise way by P.C. Conant in the case of a regulator. But, roughly speaking, Ashby's principle of requisite variety tells that to resist a certain variety of aggressions it is necessary to dispose of at least the same variety of strategies.

Among the traits common to cybernetics and systems we have : the search for isomorphisms, the concept of homeostasis pointed out by Bertalanffy, introduced by C. Bernard and named by W.B Cannon, the importance of the global point of view on which insisted Bertalanffy (the necessity of local and global views being in fact both useful as remarked by Pascal), the concept of open system due to Bertalanffy inspired by biology, dissipative structures proposed by I. Prigogine, self-organization or auto-poiesis, synergetics introduced by H. Haken, order by noise proposed by H. Von Förster (in fact an order already present in a potential manner and revealed by the triggering action of noise), fuzzy control due to L. Zadeh, the concept of chaos linked the so-called strange attractors, economic cybernetics (O. Lange, M. Manescu), management cybernetics (S. Beer with "The Brain of the Firm", 1972), the so-called artificial life...

THE OBSERVER AND THE ACTOR

The ideas of observation and action are already in germ in Wiener's cybernetics. The regulator "observes" through a communication channel the gap between what is realized and what is to be done, then "acts" consequently by means of a decision signal. This remark is at the root of the introduction by R. Valé e, in 1951, of the mathematical concept of "observation operator" which involves the observation of the system by itself as well as that of the outside world. Second order cybernetics, introduced by H. Von Förster in the 70's, emphasizes the role of the observer and self-reference considered also by G. Pask and others. In this frame H. von Förster proposed, in terms of self-organization (or autopoiesis), an interpretation of Piaget's genetic epistemology elaborated in the 30's. This presentation introduces the concept of

eigen-behaviors considered later by F. Varela and H. Maturana who proposed the idea of operational closure.

When Wiener wrote with A. Rosenblueth and N. Bigelow (1943) an article entitled “Behavior, purpose and teleology”, he insisted upon the fact that cybernetics has much to do with action, an idea expressed by L. Couffignal saying that “cybernetics is the art of making action efficient”. In the 50’s E. Bernard-Weil presented his theory of ago-antagonism which proposes the implementation of actions of opposite nature in a non-linear dynamical system. But action must not be considered alone, it needs cognition based upon observation. Both of them play their part in epistemopraxiology proposed by R. Val e (1974, 1998) which takes into account the aspects of subjectivity due to inverse transfer of the epistemological and praxiological traits engraved in the system itself.

SOME POSSIBLE ASPECTS OF THE FUTURE OF CYBERNETICS AND SYSTEMS

A possible direction is the progress of epistemology and praxiology, as exposed above, with the help of models given by systems which are able to “perceive, decide and act”. If such models do not give a real insight in the problem of consciousness (which seems to be: “who” is the subject of the expression to be conscious ?) they give descriptions of how information is conveyed to consciousness. Plato’s cave gives a metaphor of the infirmity of a perceiving system. These infirmities are difficult, if not impossible, to avoid but they must be at least recognized. If we have to fight against them, we must also accept them as an intrinsic trait of knowledge, whatever their origin : subjectivity of perception as seen above, probabilistic uncertainties, fuzziness (L. Zadeh, already quoted about control). So not all systems are perfectly well known. An extreme case is that of the black box whose structure is hidden. On the opposite we have what could be called the “white box”, an ideal system completely transparent to our investigations. In between is the most usual case of the grey system (J.L. Deng, S.F. Liu, Yi Lin) on which we have only an incomplete information. Here is a trend of coming cybernetics and systems based upon the acceptance of our limited knowledge capacities.

Another important theme is that of the prolongation of human beings’ senses and effectors by artificial organs and also of the constitution of networks of connected systems. Here I quote (with permission of Unesco) an article entitled “Cybernetics and the future of man” (Val e R. 1952) : “It may be said that the evolution of man, which is perhaps proceeding on the mental plane but which biologically speaking

seems to have been halted is now at work in the sphere of the “artificial”. The telecommunication instruments, extend the range of the natural human organs almost indefinitely. Technological evolution has thus transformed, not indeed “biological man”, but the bio-mechanical unit constituted by man and his instruments. We are in fact confronted with a new being, who is also capable of rapid and unexpected improvements and who, since he is in a constant state of evolution, is difficult to describe in concrete terms. A curious symbiosis is established, with a whole section of the inanimate world collaborating with man and so closely as to become a part of him. Just as the symbiosis of man and machine gives birth to a new being—the modern product of evolution—so the alliance of society and the machine engenders a creature of gigantic dimensions, who is gradually extending its influence over the whole surface of the globe”.

Ashby’s concept of requisite variety seems to have an important future. To dispose of several strategies in order to be able to answer to the unexpected is necessary for survival. But too many strategies generate unbearable complications and one strategy only may be fatal, just a necessary and sufficient variety is requested. This has permitted certain animal species to survive, to a human being to find a new activity after the loss of his usual work or to an industrial company to reconvert itself. At a higher level we can say that a civilisation must avoid both the unique thought and the scattering of doctrines. It must have at its disposal several visions of the world. If it is attacked, from the inside or the outside, by unexpected means, it can face them only by implementing new attitudes. If we consider mankind as a whole, we must avoid the danger of a unique culture because if we see, even imperfectly, the present dangers we do not know those which are to come.

BIBLIOGRAPHY

- Andrew, A. 1989. *Self-organizing Systems*. Gordon and Breach, New York.
- Ashby, W.R. 1956. *An Introduction to Cybernetics*. Chapman and Hall, London.
- Beer, S. 1965. *The Brain of the Firm*. Penguin Press, London.
- Bernard-Weil, E. 1975. *L’Arc et la Corde*. Maloine, Paris.
- Bertalanffy, L. Von 1950. “Zu Allgemeinen Systemlehre”. *Blätter für Deutsche Philosophie*, No. 3–4.
- Bertalanffy, L. von 1968. *General System Theory*. George Braziller, New York.
- Brillouin, L. 1956. *Science and Information Theory*. Academic Press, New York.
- Förster H. von 1994. *The Cybernetics of Cybernetics*. University of Illinois, Urbana.

- Förster H. von 1976. "Objects ; Tokens for (eigen)-behaviors". *Cybernetics Forum*, Vol. 8, No.3—4, pp.91—96.
- Haken, H. 1978. *Synergetics*. Springer-Verlag, Berlin.
- Liu, S. F. and Lin, Yi 1998, *An Introduction to Grey Systems*. IIGSS Academic Publishers, Grove City.
- Maturana, H. and Varela, F. 1973. "Autopoietic Systems ; a Characterisation of the Living Organization" .In: *Autopoiesis and Cognition, ; The Realization of the Living*, Edited by H. Maturana and F .Varela, Reidel, Boston.
- McCulloch, W.S. and Pitts, W. 1943. "A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity". *Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 5, pp. 115—133.
- McCulloch, W. S. 1965. *Embodiments of Mind*. The MIT Press, Cambridge (Mass.).
- Pask, G. 1975. *Conversation, Cognition and Learning*. In: *A Cybernetic Theory and Methodology*. Elsevir, Amsterdam.
- Rosenblueth, A., Wiener, N. and Bigelow, J. 1943. "Behavior, Purpose and Teleology". *Philosophy of Science*, Vol. 10, pp. 18—24.
- Shannon, C.E. and Weaver, W. 1949. *The Mathematical Theory of Communication*. The University of Illinois Press, Urbana.
- Valé e, R. 1995. *Cognition et Système. Essai d'Episté mo-Praxé ologie. L'Interdisciplinaire*, Limonest.
- Valé e, R. 1998. "An Introduction to 'Epistemo-praxiology'". *Cybernetics and Human Knowing*, Vol.5, No.1, pp.47—55.
- Wiener, N. 1948. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Hermann et Cie., Paris.; The Technology Press, Cambridge (Mass.) ; John Wiley and Sons., New York.
- Wiener, N. 1949. *Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series*. The Technology Press of MIT, Cambridge (Mass.); John Wiley and Sons, New York.
- Zadeh, L.1965, "Fuzzy Sets and Systems". In: *Systems Theory* edited by J. Fox, Polytechnic Press, Brooklyn.

BIOGRAPHY

Valé e, Robert, born on October 5th 1922 in Poitiers (France). Address: 2 rue de Vouillé , 75015 Paris, France.

Secondary studies; Lycée d'Angoulême. University studies : Ecole polytechnique (Paris), Université de Paris (Drès Sciences, Maths).

Associate Director of Institute Blaise Pascal (1956—1958). Maître de conférences at Ecole polytechnique (1961—1971). Professor at Université de Besançon (1962—1971). Professor (1971—1987) then Professor emeritus at Université Paris-Nord. Professor at Université Paris 1 (1975—1987). Director-General of Institute de Sciences Mathématiques et Economiques Appliquées (1980—1982). Editor of Revue Internationale de Systémique (1986—1988). Director-General of the World Organisation of Systems and Cybernetics (1987). President of WOSC (2003).

Founder of the Cercle d'Etudes Cybernétiques (1950). Member of Société Mathématique de France (member of the Council, 1964—1967). Member of the Board of Administration of Association Internationale de Cybernétique. Honorary President of the Collège de Systémique de l'AFSCET. Member of the Council of AFSCET. Member of the American Society for Cybernetics, of the International Society for the Systems Sciences and of TAKIS. Vice-President of Cybernetics Academy Odobleja. Member of Académie Francophone d'Ingénieurs. Member of the board of international journals devoted to cybernetics and systems.

Author of more than 130 articles on mathematics, cybernetics and systems. Author of a book on *Cognition et Systême*. *Essai d'épistémopragmologie*, Editor of two books on systems and information applied to economics.

Honorary Fellow of WOSC (1979). Medal of Collège de Systémique de l'AFSCET (1984). Norbert Wiener Memorial Gold Medal (1990). Dr Honoris Causa of Universitatea din Petrosani (2000).

第三版序一(中译文)

——系统与控制:回顾与展望

创始人和先驱

人们将那些首先把系统或控制的现代意义公诸于众的人视作该领域的创始人。就控制论而言,最杰出的创始人当之无愧应属罗伯特·维纳和沃伦·麦卡洛克。1943年,在 Macy 基金会资助下,维纳,麦卡洛克, J.冯·诺依曼以及“目的论协会”

的一些成员开始关注一个全新的领域，这就是后来的控制论。1948年，维纳的著作《关于在动物和机器中控制和通信的科学》在法国巴黎出版，被公认为是控制论正式诞生的标志。但是，麦卡洛克的贡献也不能低估，1943年，他就与沃尔特·皮兹合作发表了“神经活动的逻辑计算”一文。

在系统科学中，最负盛名的是贝塔朗菲。他在20世纪20年代提出了一般系统论的概念，1945年发表了第一篇关于一般系统论的论文，1968年出版《一般系统论：理论、发展、应用》一书。

在某种意义上，柏拉图通常被视为控制论的先驱，早在1843年，他在《理想国》一书中，就已引入“Kybernetike”一词。还有在《科学哲学随笔》一书中使用了“cyberné tique”一词的安培和在《哲学与控制——管理国家的艺术》一书中提出了“kebernetiki”的特伦多斯基，也被公认为控制论的先驱。罗马尼亚的S.奥德布列加和P.波斯特尼库也被视为控制论的先驱。系统科学的先驱则是A.波格丹诺夫和特科多罗基亚。

控制论中另外两个值得一提的先哲分别是莱布尼兹和笛卡儿。莱布尼兹致力于用通用符号构建一般逻辑，这使得他在“组合的艺术”一文中提出的“思维运算”得以实现，而被维纳奉为控制论的先驱。莱布尼兹的工作比帕斯卡更接近现代理论。麦卡洛克则认为是笛卡儿开创了控制论。他的论据是笛卡儿1664年就在一篇文章中第一次使用了负反馈的概念，并通过对人将靠近火的脚移开的描述阐明了反射；笛卡儿1637年在《折光学》一书中指出视网膜上的成像是由与其所代表的物体完全不同的信号传送到大脑形成的。麦卡洛克认为这一论断无疑是揭示控制论的先导法则。

基本概念

维纳所著《控制论》的副标题揭示了两个重要的基本概念：控制和通信，两者均是负反馈的基础。负反馈广泛地应用于调整滴漏供水和风车旋转速度等。系统的可控性是指切换系统状态的可能性，它涵盖了卡尔曼对负反馈的归纳概括以及贝尔曼和庞特里亚金对优化转换过程的研究。

通信，或者更确切地说信号理论，已经在反馈中出现。1949年，维纳在“平稳时间序列的外推、内插与平滑”一文中解决了最优预测和噪声清除问题。这一工作虽然在柯尔莫哥洛夫之后但却是维纳独立完成的。维纳认为通信中另一个至关重要的方面是信息量的概念。信息量是香农在《通信的数学理论》一书中提出的，并早为纳奎斯特和哈特利以及J.冯·诺依曼所预见。信息量并无任何字面含义，它仅仅是测度信号所携带信息之不确定性的一个指标。简言之，概率为 p 的信息，其信息量为 $-\log p$ ，此处 \log 是以2为底的对数。因此，当信息完全未知($p=0$)时，信息量等于无穷，而当信息已知($p=1$)时，信息量为0。 $p=1/2$ 则对应于信息量的单位(比特，或哈特利)。更通俗的理解是，告知 n 种可能事件哪一个实际发

生这一信息所对应的信息量的均值在形式上等于至少一个因子包含玻尔兹曼常数的具有 n 种可能状态的统计系统的熵。香农在信道传输容量的研究中使用了信息量的概念。信息量与熵的形似引发了西拉德、曼德尔布罗特和布里渊的研究兴趣。曼德尔布罗特据此解释了麦克斯韦,而布里渊则建立了物理测量理论。德布罗意认为这些尝试极富前景,不过它们仍颇具争议性。

控制论中另一个重要的概念是艾什比在《控制论导引》一书中提出的必要的多样性。它与博弈论和信息论密不可分,并在康南特的标准仪中得到了精确应用。概略地讲,艾什比的必要的多样性理论告诉我们,要抵御多种可能的攻击,必须准备至少同样多的策略。

系统科学与控制论的共同点主要有:对同构的研究,同构概念最早由贝塔朗菲提出,克罗德·班纳做了进一步研究,并最终由坎农命名;贝塔朗菲所倡导的全局观点的重要性,事实上,帕斯卡也强调局部和整体观点均意义深远;贝塔朗菲受生物学启发提出了开放系统的概念;普利高津提出的耗散结构,自组织或自我繁衍;哈肯提出的协同学;福斯特提出的噪声序;扎德提出的模糊控制;以及与奇怪吸引子相关的混沌;经济控制论、管理控制论、人造生命等。

观测与行为论者

观测与行为的概念在维纳的控制论中已经初见端倪。1951年,R.瓦利引入了同时涉及系统自身与外界观察的数学概念——观察算子,据此,“观测”又被视为连接“已实现的”和“要完成的”二者之间的桥梁或渠道,而“行动”通常被赋予决策信号的意义。H.冯·福斯特在20世纪70年代提出的二阶控制,再次强调了由帕斯卡和其他学者所论及的观测者和自我评价的重要性。在此框架下,根据自组织(自我繁衍)理论,福斯特解释了皮亚杰在20世纪30年代提出的基因认识论,引入了本能行为的概念。F.瓦雷拉和H.玛图拉继福斯特之后对本能行为进行了深入探究,并提出了运作闭包思想。

1943年,维纳与N.别格罗和A.罗森勃吕特合写了“行为、目的和目的论”的论文,他坚信控制论与行为密切相关,L.库菲格将他的理念阐明为“控制论是使行为更加有效的艺术”。在20世纪50年代,E.班纳·威尔发表了他的前对抗论,指出在非线性动态系统中存在的对抗性行为。但是单独考虑行为是没有意义的,而需要建立在观测基础上的认知。二者在R.瓦利提出的认识行为学中皆被赋予更深刻的意义。在这里,由于系统自身认识论和行为论特点的逆转所导致的主观性的各个方面都得到了充分考虑。

系统与控制的未来趋势

系统与控制未来可能的发展方向之一是借助于“感知、决策、行动”系统模型,在认识论和行为论研究方面取得新的进展。即使这些模型不能深刻洞察认知问

题,在描述信息是如何传达给知觉上,它们还是有其特定作用的。柏拉图洞穴对感官系统的缺陷给了一个恰如其分的比喻。这些缺陷,纵然不是完全不可能,也是很难避免的,但至少我们必须意识到它们的存在。克服这些缺陷,我们首先要承认它们是知识的本质属性,尽管它们的成因各不相同。比如有的是认知过程的主观不确定性,有的是随机不确定性,还有的根源于模糊性。因此,不是所有的系统都是完全已知的。一种极端的情况就是隐藏结构的所谓“黑箱”,与之相反的是对于研究者而言完全明朗的理想系统,我们称作“白箱”。介于二者之间的就是最普遍的情形——“部分信息已知,部分信息未知”的灰色系统(邓聚龙,刘思峰,林益)。基于人类认知能力的局限,灰色系统代表了系统与控制领域未来的发展趋势之一。

与此同时,借助人造器官延伸人类感官,构建系统联接网络,正悄然兴起,成为具有举足轻重意义的新主题。这里引用 R. 瓦利 1952 年发表的“控制论与人类未来”一文中的话:“人类的进化,在精神层面来看,也许还在不断进行着,但是从生物学观点出发,似乎已停滞不前,不过如今正在人造领域内取得进展。电信设备几乎无限延伸了人类感官范围。技术进步形成的不再是单纯的生物人,而是人机共同构成的生物机械单元。我们面对的是新生物,能够迅速和出人意料地获得改进,但由于其处于进化的稳定状态,我们难以用具体的词汇来描述它。一种奇怪的共生关系诞生了,整个无生命世界与人类结合得如此紧密,几乎成为人的一部分。正如人机共生带来了现代进化的新事物,一个能量巨大的超高维创造物会随着社会与机器的联合而产生,它的影响将波及全球。”

艾什比提出的必要的多样性概念的重要性也与日俱增。为了生存,人们必须准备多种策略以应对意外事件。然而,过多的策略产生的复杂性令人难以承受,单一策略也不可行,我们需要的是满足充分必要性的策略种数。惟其如此,一定种类的物种才能得以繁衍,人们才能在失业后找到新的工作,公司才能自我复苏。从更高层面上理解,即文明进程既要避免单一思想支配又不可学说泛滥,它必须拥有在文明能控制的范围内的适量的世界观。一旦文明遭到意外攻击,不管是来自外部的还是内部的,我们只能采取新的态度面对。同样,如果将人类视作一个整体,我们必须避免单一文化的危险,因为,即使我们了解目前的危险——实际上并不全面,对于未来的吉凶,我们几乎一无所知。

系统与控制世界组织主席 罗伯特·瓦利

向一莎译,刘思峰审校

第三版序二

在系统研究中,由于内外扰动的存在和认识水平的局限,人们所得到的信息往往带有某种不确定性。随着科学技术的发展和人类社会的进步,人们对各类系统不确定性的认识逐步深化,不确定性系统的研究也日益深入。20世纪后半叶,在系统科学和系统工程领域,各种不确定性系统理论和方法的不断涌现形成了一大景观。如扎德(L. A. Zadeh)教授60年代创立的模糊数学,邓聚龙教授80年代创立的灰色系统理论,帕拉克(Z. Pawlak)教授80年代创立的粗糙集理论(Rough Sets Theory)和王光远教授于90年代创立的未确知数学等,都是不确定性系统研究的重要成果。这些成果从不同角度、不同侧面论述了描述和处理各类不确定性信息的理论和方法。

刘思峰教授长期致力于灰色系统理论研究,主持完成国家、省部级项目及国际合作课题20多项,在国内外重要刊物上发表论文160多篇。先后于20世纪80年代提出缓冲算子、灰色绝对关联度、灰色定权聚类评估模型及灰色非负矩阵系列概念与定理,90年代提出缓冲算子及其公理系统、广义灰色关联度、灰数及其信息含量测度、灰参数线性规划(LPGP)漂移及定位求解、GM(1,1)模型的适用范围、灰色经济计量学模型、灰色生产函数模型等。近来,他和他的博士生在灰色模型优化和灰色博弈模型研究方面又取得新的进展。刘思峰的研究工作受到国内外同行的关注和首肯,并被数位知名学者在其著作中专章介绍。其研究专著《灰色系统理论及其应用》河南大学出版社1991年推出第一版,科学出版社1999年推出第二版,2000年第三次印刷,2001年获“中国高校自然科学奖”二等奖,2004年第四次印刷,在同行中引起较大反响。英文专著“An Introduction to Grey Systems: Foundations, Methodology and Applications”1998年由美国IIGSS学术出版社出版,在西方产生了一定影响。刘思峰也于2002年获系统与控制世界组织奖。

《灰色系统理论及其应用》第三版在第二版的基础上增加了许多新的内容,展示出灰色系统理论的蓬勃生机和近年来取得的新成果。我非常高兴地向读者推荐这本集理论研究 and 应用开拓于一体的科学著作,深信她的出版一定会有力地推动灰色系统理论这门新学科的迅速发展。

中国科学院院士 陈达

2003年4月24日

第二版序

系统科学学科群的产生和迅速发展已成为当代科学发展的一大景观。本世纪40年代以来,相继出现了系统论、信息论、控制论、耗散结构理论、协同学、突变论、分形理论、超循环理论、动力系统理论等一大批系统科学新兴学科。灰色系统理论是80年代初期由我国学者邓聚龙教授创立的一门系统科学新学科。

由于众所周知的原因,我国大规模的系统科学研究应用比西方国家滞后了20多年。西方的系统运动兴起于50年代中期,我国的系统科学研究热潮则出现于70年代中后期。当时,在钱学森、宋健等同志的大力倡导下,一批在数学、工程、经济等领域有影响的专家率先转入系统科学研究领域,中国科学院及有关部委组建了系统科学或系统工程研究所,不少高校设置了系统工程或管理工程专业,建立了研究机构,并开始招收、培养系统工程、管理工程专业的本科生、硕士生和博士生。1980年,成立了中国系统工程学会。系统科学研究和系统工程方法、技术应用于我国各级管理决策及各个科学领域,取得了一大批重要成果。这一切,为系统科学新学科在我国的生产提供了适宜的土壤和条件,灰色系统理论正是在这样一种社会环境下产生并得到迅速发展的。

灰色系统理论以“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“部分”已知信息的生成、开发,提取有价值的信息,实现对系统运行规律的正确描述和有效控制。目前,这一日趋成熟的新理论已赢得了国际、国内学术界的肯定和关注。

刘思峰同志从20世纪80年代中期开始从事灰色系统理论研究、应用和教学工作,他和课题组的同志们在新的科学园地中大胆探索,勤奋开拓,不仅在理论、方法上有一定创新和建树,同时将灰色系统理论等系统工程方法应用于区域科技、经济系统分析和预测、决策、规划、战略研究实践,亦取得可喜的成绩。他与国内外同行合作完成的《灰色系统理论及其应用》(河南大学出版社,1991)、《区域经济评估·预警·调控》(河南人民出版社,1994)、《中观经济管理——理论·模型·应用》(华中理工大学出版社,1997)和“An Introduction to Grey Systems: Foundations, Methodology and Applications”(美国 IIGSS 学术出版社,1998)等著作,都反映出融理论探索和应用开拓于一体的鲜明特色。

《灰色系统理论及其应用》(第二版)系统地介绍了灰色系统的基本理论、基本方法和应用技术,吸收了国内外同行的新成果,较为全面地向读者展示了灰色系统理论这一新学科的概貌及其前沿发展动态。书中灰色序列算子、缓冲算子公理系统、灰数及其信息含量测度公式、灰色绝对关联度、灰色相对关联度、灰色综合关联

度、定权灰色聚类评估和基于三角白化权函数的灰色评估新方法、LPGP 漂移及定位求解、GM(1,1)模型的适用范围、灰色经济计量学模型(G-E)、灰色生产函数模型(G-C-D)、灰色投入产出模型(G-I-O)和灰色马尔可夫模型(G-M)等系作者首次提出。

我们有机会阅读了该书的初稿,由衷地为我国青年学者所取得的成绩而欣慰。相信这本既有学术价值,又有实用价值著作的出版,定会为推动灰色系统理论和系统工程研究的深入发展,促进我国管理决策的科学化做出积极贡献。

国际系统科学联合会主席 顾基发

中国工程院院士 | 许国志

1999年3月30日

第一版序

刘思峰和郭天榜同志撰写的《灰色系统理论及其应用》一书是一本立足于实际,着眼于开拓,既阐述理论,又兼顾应用的综合性著作,具有广泛的参考价值。本书将“河南省工业系统技术改造研究”、“河南省粮食生产决策支持系统”,以及为“科技兴豫”所进行的决策支持研究等成果融会贯通、升华发展,在运用灰色系统的理论、方法、观点、概念,支持决策、咨询实际等方面均具特色。书中有关序列算子等数学思路与方法,属作者独创。

这样一本有理论、有实际,有研究、有应用,有背景、有升华,有继承、有开拓的著作,将为灰色系统理论的发展与软科学的实用化做出贡献。

华中理工大学教授
灰色系统英文杂志主编
邓聚龙

1990年1月15日

前 言

1982年,中国学者邓聚龙教授创立灰色系统理论。灰色系统理论以“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“部分”已知信息的生成、开发,提取有价值的信息,实现对系统运行行为、演化规律的正确描述和有效监控。社会、经济、农业、工业、生态、生物等许多系统,是按照研究对象所属的领域和范围命名的,而灰色系统却是按颜色命名的。在控制论中,人们常用颜色的深浅形容信息的明确程度,如艾什比(Ashby)将内部信息未知的对象称为黑箱(Black Box),这种称谓已为人们普遍接受。我们用“黑”表示信息未知,用“白”表示信息完全明确,用“灰”表示部分信息明确、部分信息不明确。相应地,信息完全明确的系统称为白色系统,信息未知的系统称为黑色系统,部分信息明确、部分信息不明确的系统称为灰色系统。

自本书第二版问世以来,在灰色系统领域,理论探索和应用研究都取得了许多新的进展。基于作者和国内外同行近年来取得的新成果,第三版在第二版的基础上做了较大改写,力求较为系统、全面地向读者展示灰色系统理论这一新学科的概貌及其前沿发展动态。本书由刘思峰提出总体写作方案并组织撰稿,党耀国、方志耕等同志参与了方案的讨论。其中第一章、第三章由刘思峰执笔;第二章由王子亮执笔;第六章、第七章由刘思峰、王子亮执笔;第四章、第五章、第九章由党耀国执笔;第八章由李炳军执笔;第十章由罗党执笔;第十一章由翟振杰执笔;第十二章由方志耕执笔;第十三章、第十四章由刘斌执笔。全书由刘思峰统一审定。所附的计算机软件由刘斌编写。

多年来,作者的研究工作一直受到学术界前辈和有关领导的热情鼓励、指导和支持,得到众多同行专家的通力合作。中国系统工程学会副理事长于景元教授和东南大学达庆利教授对本书的出版鼎力推荐,系统与控制世界组织主席罗伯特·瓦利(Robert Vallee)博士,南京航空航天大学陈达院士,国际系统科学联合会主席顾基发教授,灰色系统理论创始人、全国灰色系统研究会理事长邓聚龙教授和已故的原中国科学院系统科学研究所许国志院士都曾在百忙之中先后为本书的各版做序,中国科学院科学出版基金委员会和南京航空航天大学的领导、专家对本书的出版给予大力支持,在此,作者谨向他们表示衷心感谢!

灰色系统理论是一个十分年轻的新学科,仍处于不断发展、完善的过程之中。书中不妥之处,在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2004年6月26日

目 录

| | |
|--------------------|------|
| 前言 | |
| 第一章 灰色系统的概念与基本原理 | (1) |
| 1.1 灰色系统理论的产生与发展动态 | (1) |
| 1.2 灰色系统的概念与基本原理 | (5) |
| 1.3 灰数及其运算 | (8) |
| 1.4 灰数白化与灰度 | (11) |
| 1.5 灰数灰度的一种公理化定义 | (14) |
| 第二章 灰色方程与灰色矩阵 | (18) |
| 2.1 灰色代数方程与灰色微分方程 | (18) |
| 2.2 灰色矩阵及其运算 | (18) |
| 2.3 几种特殊的灰色矩阵 | (21) |
| 2.4 灰色矩阵的奇异性 | (22) |
| 2.5 灰色特征值与灰色特征向量 | (24) |
| 第三章 序列算子与灰色序列生成 | (26) |
| 3.1 引言 | (26) |
| 3.2 冲击扰动系统与序列算子 | (27) |
| 3.3 均值生成算子 | (38) |
| 3.4 序列的光滑性 | (40) |
| 3.5 级比生成算子 | (42) |
| 3.6 累加生成算子与累减生成算子 | (44) |
| 3.7 累加生成的灰指数律 | (46) |
| 第四章 灰色关联分析 | (50) |
| 4.1 灰色关联因素和关联算子集 | (51) |
| 4.2 距离空间 | (53) |
| 4.3 灰色关联公理与灰色关联度 | (55) |
| 4.4 广义灰色关联度 | (61) |
| 4.5 其它几种灰色关联度 | (72) |
| 4.6 关联序 | (76) |
| 4.7 优势分析 | (78) |
| 4.8 应用实例 | (84) |
| 第五章 灰色聚类评估 | (96) |
| 5.1 灰色关联聚类 | (96) |

| | | |
|------------|----------------------|--------------|
| 5.2 | 灰色变权聚类 | (99) |
| 5.3 | 灰色定权聚类 | (104) |
| 5.4 | 基于三角白化权函数的灰色评估 | (108) |
| 5.5 | 灰色评估系数向量的熵 | (109) |
| 5.6 | 应用实例 | (113) |
| 第六章 | 灰色系统模型 | (125) |
| 6.1 | 引言(五步建模思想) | (125) |
| 6.2 | GM(1,1)模型 | (126) |
| 6.3 | 残差 GM(1,1)模型 | (134) |
| 6.4 | GM(1,1)模型群 | (138) |
| 6.5 | GM(1,1)模型的适用范围 | (142) |
| 6.6 | GM(1, N)和 GM(0, N)模型 | (146) |
| 6.7 | GM(2,1)和 Verhulst 模型 | (150) |
| 6.8 | GM 模型参数优化 | (158) |
| 第七章 | 灰色系统预测 | (163) |
| 7.1 | 引言 | (163) |
| 7.2 | 数列预测 | (164) |
| 7.3 | 区间预测 | (167) |
| 7.4 | 灰色灾变预测 | (172) |
| 7.5 | 波形预测 | (178) |
| 7.6 | 系统预测 | (183) |
| 第八章 | 灰色组合模型 | (185) |
| 8.1 | 灰色经济计量学模型 | (186) |
| 8.2 | 灰色生产函数模型 | (192) |
| 8.3 | 灰色-周期外延组合模型 | (195) |
| 8.4 | 灰色人工神经网络模型 | (199) |
| 8.5 | 显性灰色组合模型的基本建模方法 | (201) |
| 8.6 | 灰色线性回归组合模型 | (203) |
| 8.7 | 灰色马尔可夫模型 | (206) |
| 第九章 | 灰色决策 | (210) |
| 9.1 | 灰色决策基本概念 | (210) |
| 9.2 | 灰靶决策 | (211) |
| 9.3 | 灰色关联决策 | (216) |
| 9.4 | 灰色发展决策 | (223) |
| 9.5 | 灰色聚类决策 | (226) |
| 9.6 | 单目标化局势决策 | (229) |

| | |
|--------------------------------|-------|
| 第十章 灰色规划 | (234) |
| 10.1 灰参数线性规划..... | (235) |
| 10.2 灰色预测型线性规划..... | (237) |
| 10.3 灰色漂移型线性规划..... | (240) |
| 10.4 灰色线性规划的准优解..... | (248) |
| 10.5 灰色 0-1 规划..... | (251) |
| 10.6 灰色多目标规划..... | (257) |
| 10.7 灰色非线性规划..... | (259) |
| 10.8 灰色动态规划..... | (265) |
| 10.9 应用实例..... | (272) |
| 第十一章 灰色投入产出 | (279) |
| 11.1 灰色投入产出的基本概念..... | (279) |
| 11.2 灰色非负矩阵的 P-F 定理..... | (281) |
| 11.3 灰色感应度系数与影响力系数..... | (286) |
| 11.4 灰色投入产出优化模型..... | (288) |
| 11.5 灰色动态投入产出模型..... | (292) |
| 11.6 应用实例..... | (294) |
| 第十二章 灰矩阵博弈理论 | (299) |
| 12.1 基于纯策略的标准灰矩阵博弈模型构建..... | (299) |
| 12.2 标准灰矩阵博弈的纯策略解..... | (305) |
| 12.3 标准灰矩阵博弈的灰混合策略..... | (311) |
| 12.4 最大、最小灰博弈值与灰混合策略的灰鞍点..... | (313) |
| 12.5 灰混合策略的线性规划模型..... | (318) |
| 12.6 灰混合策略的灰线性规划模型求解..... | (322) |
| 第十三章 灰色控制 | (329) |
| 13.1 控制与灰色控制..... | (329) |
| 13.2 灰色线性控制系统..... | (330) |
| 13.3 灰色传递函数与典型环节..... | (332) |
| 13.4 灰色传递函数矩阵..... | (335) |
| 13.5 几种典型的灰色控制..... | (336) |
| 13.6 应用实例..... | (339) |
| 第十四章 灰色建模系统的开发与应用 | (345) |
| 14.1 灰色建模系统开发..... | (345) |
| 14.2 灰色建模系统的应用说明..... | (346) |
| 参考文献 | (358) |
| 名词术语中英文对照 | (373) |

第一章 灰色系统的概念与基本原理

1.1 灰色系统理论的产生与发展动态

一、灰色系统理论产生的科学背景

现代科学技术在高度分化的基础上高度综合的大趋势,导致了具有方法论意义的系统科学学科群的出现。系统科学揭示了事物之间更为深刻、更具本质性的内在联系,大大促进了科学技术的整体化进程;许多科学领域中长期难以解决的复杂问题随着系统科学的出现迎刃而解;人们对自然界和客观事物演化规律的认识也由于系统科学的出现而逐步深化。20世纪40年代末期诞生的系统论、信息论、控制论,产生于20世纪60年代末、70年代初的耗散结构理论、协同学、突变论、分形理论以及70年代中后期相继出现的超循环理论、动力系统理论、泛系理论等都是具有横向性、交叉性的系统科学新学科。

在对系统的研究中,由于内外扰动的存在和认识水平的局限,人们所得到的信息往往带有某种不确定性。随着科学技术的发展和人类社会的进步,人们对各类系统不确定性的认识逐步深化,不确定性系统的研究也日益深入。20世纪后半叶,在系统科学和系统工程领域,各种不确定性系统理论和方法的不断涌现形成一大景观。如扎德(L. A. Zadeh)教授于60年代创立的模糊数学,邓聚龙教授于80年代创立的灰色系统理论,帕拉克(Z. Pawlak)教授于80年代创立的粗糙集理论(Rough Sets Theory)和王光远教授于90年代创立的未确知数学等,都是不确定性系统研究的重要成果。这些成果从不同角度、不同侧面论述了描述和处理各类不确定性信息的理论和方法。

1982年,中国学者邓聚龙教授创立的灰色系统理论,是一种研究少数据、贫信息不确定性问题的新方法。灰色系统理论以“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“部分”已知信息的生成、开发,提取有价值的信息,实现对系统运行行为、演化规律的正确描述和有效监控。灰色系统模型对实验观测数据没有什么特殊的要求和限制,因此应用领域十分宽广。

二、灰色系统理论的产生与发展动态

1982年,北荷兰出版公司出版的《系统与控制通讯》(Systems & Control Letters)杂志刊载了我国学者邓聚龙教授的第一篇灰色系统论文“灰色系统的控制问题”(The Control Problems of Grey Systems);同年,《华中工学院学报》刊载了邓聚

龙教授的第一篇中文灰色系统论文“灰色控制系统”。这两篇开创性论文的公开发表,标志着灰色系统理论这一新兴横断学科开始问世。这一新理论刚一诞生,就受到国内外学术界和广大实际工作者的积极关注,不少著名学者和专家给予充分肯定和大力支持,许多中青年学者纷纷加入灰色系统理论研究行列,以极大的热情开展理论探索及在不同领域中的应用研究工作。尤其是它在众多科学领域中的成功应用,赢得了国际学术界的肯定和关注。目前,英国、美国、德国、日本、澳大利亚、加拿大、奥地利、俄罗斯等国家及中国台湾、香港地区以及联合国等国际组织有许多学者从事灰色系统的研究和应用。1989年在英国创办的英文版国际学术刊物《灰色系统学报》(The Journal of Grey System)已成为《英国科学文摘》(SA)、《美国数学评论》(MR)等重要国际文摘机构的核心期刊。全世界有300余种学术期刊接受、刊登灰色系统论文,美国计算机学会会刊、台湾《模糊数学通讯》、系统与控制国际杂志 Kybernetes(SCI源期刊)出版了灰色系统专辑。

世界上有100多所大学如华中科技大学,中国人民大学,清华大学,浙江大学,山东大学,南京航空航天大学,美国马里兰大学,日本丰桥大学,神奈川大学,维也纳经济大学,法国宇航中心,台湾中央大学和成功大学,大同工学院,大溪大学等开设了灰色系统理论课程。华中科技大学、南京航空航天大学、福州大学和武汉理工大学已招收、培养灰色系统专业方向的博士研究生,世界各国高等学校计有数千名博士、硕士研究生运用灰色系统的思想方法开展科学研究,撰写学位论文。

国内外许多出版机构,如科学出版社、国防工业出版社、华中理工大学出版社、江苏科学技术出版社、山东人民出版社、科学技术文献出版社、台湾全华科技图书出版社、台湾高立图书有限公司、日本理工出版社、美国 IIGSS 学术出版社……出版灰色系统学术著作60余种。一批新兴边缘学科如灰色水文学、灰色地质学、灰色育种学、区域经济灰色系统分析、灰色哲学……应运而生。国家及各省、市科学基金积极资助灰色系统研究,每年都有一大批灰色系统理论或应用研究项目获得各类基金资助。据统计,全国各地有160多项灰色系统成果获得国家或省部级奖励;2002年,我国灰色系统学者获系统与控制世界组织奖。

据不完全统计,SCI, EI, ISTP, SA, MR, MA 等国际权威性检索机构跟踪、摘引我国学者的灰色系统论著3000多次;据中国科学引文数据库(CSCD)发布的信息(《中国科学时报》,1997年11月26日),华中理工大学邓聚龙教授的灰色系统理论被引用533次,居全国第一。中国国家科技部编撰出版的《中国科学技术蓝皮书(第8号)》把灰色系统理论作为中国学者创立的软科学新方法给予肯定。

许多重要国际会议,如不确定性系统建模国际会议,系统预测控制国际会议,国际一般系统研究会年会,系统与控制世界组织年会,计算机与工业工程国际会议,IEEE系统、人、控制国际会议……都把灰色系统理论列为讨论专题。如2002年3月在美国匹兹堡召开的系统与控制世界组织(WOSC)第12届年会和国际一般系统研究会(IIGSS)第4届年会联合大会共为灰色系统理论安排了6场专题会

议。2003年8月在爱尔兰利默瑞克召开的第32届计算机与工业工程国际会议，为灰色系统理论安排了4场专题会议。灰色系统理论成为许多重要国际会议关注、讨论的热点，这对于世界系统科学界同行进一步了解灰色系统理论无疑会起到积极作用。

三、几种不确定性方法的比较

概率统计、模糊数学和灰色系统理论是三种最常用的不确定性系统研究方法。其研究对象都具有某种不确定性，这是三者的共同点。正是研究对象在不确定性上的区别，才派生出了这三种各具特色的不确定性学科。

模糊数学着重研究“认知不确定”问题，其研究对象具有“内涵明确，外延不明确”的特点。比如“年轻人”就是一个模糊概念。因为每一个人都十分清楚“年轻人”的内涵。但是要让你划定一个确切的范围，在这个范围之内的是年轻人，范围之外的不是年轻人，则很难办到。因为年轻人这个概念外延不明确。对于这类内涵明确，外延不明确的“认知不确定”问题，模糊数学主要是凭经验借助于隶属函数进行处理。

概率统计研究的是“随机不确定”现象，着重于考察“随机不确定”现象的历史统计规律，考察具有多种可能发生的结果之“随机不确定”现象中每一种结果发生的可能性大小。其出发点是大样本，并要求对象服从某种典型分布。

灰色系统理论着重研究概率统计、模糊数学所难以解决的“小样本”、“贫信息”不确定性问题，并依据信息覆盖，通过序列算子的作用探索事物运动的现实规律。其特点是“少数据建模”。与模糊数学不同的是，灰色系统理论着重研究“外延明确，内涵不明确”的对象。比如说到2050年，中国要将总人口控制在15亿到16亿之间，这“15亿到16亿之间”就是一个灰概念，其外延是很清楚的，但如果要进一步问到底是15亿到16亿之间的哪个具体数值，则不清楚。

综上所述，我们可以把这三者之间的区别归纳如表1.1.1所示。

表 1.1.1 三种不确定性方法的比较

| 项 目 | 灰色系统 | 概率统计 | 模糊数学 |
|------|--------|--------|-------|
| 研究对象 | 贫信息不确定 | 随机不确定 | 认知不确定 |
| 基础集合 | 灰色朦胧集 | 康托集 | 模糊集 |
| 方法依据 | 信息覆盖 | 映射 | 映射 |
| 途径手段 | 灰序列算子 | 频率统计 | 截集 |
| 数据要求 | 任意分布 | 典型分布 | 隶属度可知 |
| 侧重 | 内涵 | 内涵 | 外延 |
| 目标 | 现实规律 | 历史统计规律 | 认知表达 |
| 特色 | 小样本 | 大样本 | 凭经验 |

四、灰色系统理论在横断学科群中的地位

人们对客观事物的认识和视角不同,划分学科体系的方式也不相同。17世纪,培根基于科学分类应与人类的记忆能力、想像能力、判断能力相对应的认识,主张把科学划分为历史、诗歌与艺术、哲学三大门类。后来,圣西门和黑格尔分别提出按形而上学和唯心主义观点划分学科的思路。19世纪后期,恩格斯提出按照物质运动的不同形式及其固有次序划分学科,建立了科学的体系结构,为学科分类奠定了坚实的科学基础。

在我们国家,人们通常把科学划分为文、理两大门类或按自然科学、数学、社会科学三大领域进行分类,对于自然科学基础学科,则习惯于按照数、理、化、天、地、生六大门类进行划分。钱学森教授则主张将整个科学技术体系划分为自然科学、社会科学、系统科学、思维科学、人体科学、数学科学等六大科学领域,每一科学领域又分为基础科学、技术科学、工程技术三个不同的层次。

这里,我们把学科划分建立在科学问题分类的基础之上,首先按照复杂性和不确定性对科学问题进行分类,然后根据各类科学问题的性质指出与之相应的具有方法论意义的横向交叉学科,从而明确了灰色系统理论在横断学科群中的地位。

用方框(Ω)表示世界上所有事物的集合,以圆 A, B, C, D 分别表示简单事物、复杂事物、确定性事物、不确定性事物的集合,可得到科学问题分类的四环图(图 1.1.1),标出解决各类问题的科学方法,即得到横断学科分类四环图(图 1.1.2)。

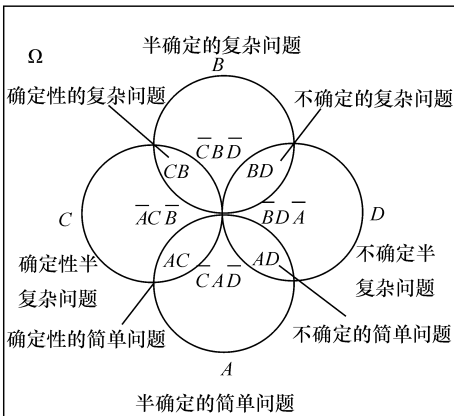


图 1.1.1 科学问题分类的四环图

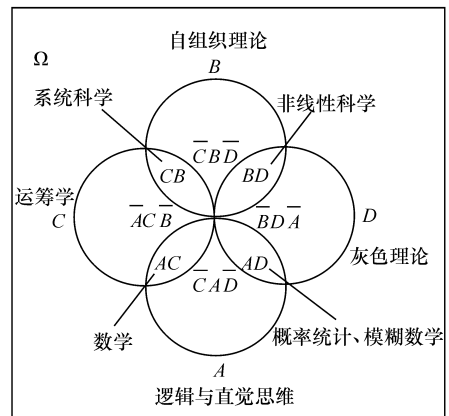


图 1.1.2 横断学科分类的四环图

对照图 1.1.1 和图 1.1.2,可以看出,作为解决不确定性半复杂问题的科学方法,灰色系统理论与解决简单不确定性的概率统计、模糊数学相比,实现了一次新的飞跃,而复杂不确定性问题的解决,则有待于非线性科学的新突破。

1.2 灰色系统的概念与基本原理

一、灰色系统的基本概念

社会、经济、农业、工业、生态、生物等许多系统,是根据研究对象所属的领域和范围命名的,而灰色系统却是按颜色命名的。在控制论中,人们常用颜色的深浅形容信息的明确程度,如艾什比(Ashby)将内部信息未知的对象称为黑箱(Black Box)。这种称谓已为人们普遍接受。再如在政治生活中,人民群众希望了解决策及其形成过程的有关信息,就提出要增加“透明度”。我们用“黑”表示信息未知,用“白”表示信息完全明确,用“灰”表示部分信息明确、部分信息不明确。相应地,信息完全明确的系统称为白色系统,信息未知的系统称为黑色系统,部分信息明确、部分信息不明确的系统称为灰色系统。

请注意“系统”与“箱”这两个概念的区别。通常地,“箱”侧重于对象外部特征而不重视其内部信息的开发利用,往往通过输入输出关系或因果关系研究对象的功能和特征。“系统”则通过对象、要素、环境三者之间的有机联系和变化规律研究其结构和功能。

灰色系统理论的研究对象是“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,它通过对“部分”已知信息的生成、开发实现对现实世界的确切描述和认识。

在人们的社会、经济活动或科研活动中,会经常遇到信息不完全的情况。如在农业生产中,即使是播种面积、种子、化肥、灌溉等信息完全明确,但由于劳动者技术水平、自然环境、气候条件、市场行情等信息不明确,仍难以准确地预计出产量、产值;再如生物防治系统,虽然害虫与其天敌之间的关系十分明确,但却往往因人们对害虫与饵料、天敌与饵料、某一天敌与其它天敌、某一害虫与其它害虫之间的关联信息了解不够,使得生物防治难以收到预期效果;价格体系的调整或改革,常常因缺乏民众心理承受力的信息,以及某些商品价格变动对其它商品价格影响的确切信息而举步维艰;在证券市场上,即使最高明的系统分析人员亦难以稳操胜券,因为你测不准金融政策、利率政策、企业改革、政治风云和国际市场变化及某些板块价格波动对其它板块之影响的确切信息;一般的社会经济系统,由于其没有明确的“内”、“外”关系,系统本身与系统环境、系统内部与系统外部的边界若明若暗,难以分析输入(投入)对输出(产出)的影响。而同一个经济变量,有的研究者把它视为内生变量,另一些研究者却把它视为外生变量,这是因为缺乏系统结构、系统模型及系统功能信息所致。

综上所述,可以把系统信息不完全的情况分为以下四种:

- (1) 元素(参数)信息不完全;
- (2) 结构信息不完全;

(3) 边界信息不完全；

(4) 运行行为信息不完全。

“信息不完全”是“灰”的基本含义。从不同场合、不同角度看，还可以将“灰”的含义加以引申(详见表 1.2.1)。

表 1.2.1 “灰”概念引申

| 视角 \ 概念 | 黑 | 灰 | 白 |
|---------|----|------|-----|
| 从信息上看 | 未知 | 不完全 | 完全 |
| 从表象上看 | 暗 | 若明若暗 | 明朗 |
| 在过程上 | 新 | 新旧交替 | 旧 |
| 在性质上 | 混沌 | 多种成分 | 纯 |
| 在方法上 | 否定 | 扬弃 | 肯定 |
| 在态度上 | 放纵 | 宽容 | 严厉 |
| 从结果看 | 无解 | 非惟一解 | 惟一解 |

二、灰色系统的基本原理

在灰色系统理论创立和发展过程中，邓聚龙教授发现并提炼出灰色系统的基本原理。读者不难看出，这些基本原理，具有十分深刻的哲学内涵。

公理 1.2.1(差异信息原理) “差异”是信息，凡信息必有差异。

我们说“事物 A 不同于事物 B”，即含有事物 A 相对于事物 B 之特殊性的有关信息。客观世界中万事万物之间的“差异”为我们提供了认识世界的基本信息。

信息 I 改变了我们对某一复杂事物的看法或认识，信息 I 与人们对该事物的原认识信息有差异。科学研究中的重大突破为人们提供了认识世界、改造世界的重要信息，这类信息与原来的信息必有差异。信息 I 的信息含量越大，它与原信息的差异就越大。

公理 1.2.2(解的非惟一性原理) 信息不完全、不确定的解是非惟一的。

“解的非惟一性原理”在决策上的体现是灰靶思想。灰靶是目标非惟一与目标可约束的统一。比如升学填报志愿，一个认定了“非某校不上”的考生，如果考分不具有绝对优势，其愿望就很可能落空。相同条件对于愿意退而求其“次”，多目标、多选择的考生，其升学的机会更多。

“解的非惟一性原理”也是目标可接近、信息可补充、方案可完善、关系可协调、思维可多向、认识可深化、途径可优化的具体体现。在面对多种可能的解时，能够通过定性分析，补充信息，确定出一个或几个满意解。因此，“非惟一性”的求解途径是定性分析与定量分析相结合的求解途径。

公理 1.2.3(最少信息原理) 灰色系统理论的特点是充分开发利用已占有的“最少信息”。

“最少信息原理”是“少”与“多”的辩证统一,灰色系统理论的特色是研究“小样本”、“贫信息”不确定性问题。其立足点是“有限信息空间”,“最少信息”是灰色系统的基本准则。所能获得的信息“量”是判别“灰”与“非灰”的分水岭,充分开发利用已占有的“最少信息”是灰色系统理论解决问题的基本思路。

公理 1.2.4(认知根据原理) 信息是认知的根据。

认知必须以信息为依据,没有信息,无以认知。以完全、确定的信息为根据,可以获得完全确定的认知,以不完全、不确定的信息为根据,只能得到不完全、不确定的灰认知。

公理 1.2.5(新信息优先原理) 新信息对认知的作用大于老信息。

“新信息优先原理”是灰色系统理论的信息观,赋予新信息较大的权重可以提高灰色建模、灰色预测、灰色分析、灰色评估、灰色决策等的功效。“新陈代谢”模型体现了“新信息优先原理”。新信息的补充为灰元白化提供了科学依据。“新信息优先原理”是信息的时效性的具体体现。

公理 1.2.6(灰性不灭原理) “信息不完全”(灰)是绝对的。

信息不完全、不确定具有普遍性。信息完全是相对的、暂时的。原有的不确定性消失,新的不确定性很快出现。人类对客观世界的认识,通过信息的不断补充而一次又一次地升华。信息无穷尽,认知无穷尽,灰性永不灭。

三、灰色系统理论的主要内容

灰色系统理论经过 20 年的发展,现已基本建立起一门新兴学科的结构体系。其主要内容包括以灰色代数系统、灰色方程、灰色矩阵等为基础的理论体系,以灰色序列生成为基础的方法体系,以灰色关联空间为依托的分析体系,以灰色模型(GM)为核心的模型体系,以系统分析、评估、建模、预测、决策、控制、优化为主体的技术体系。

灰色代数系统、灰色矩阵、灰色方程等是灰色系统理论的基础,从学科体系自身的优美、完善出发,这里有许多问题值得进一步深入研究。

灰色序列生成在本书中被统一到序列算子的概念之下,主要包括缓冲算子(弱化算子、强化算子)、均值生成算子、级比生成算子、累加生成算子和累减生成算子等。

灰色系统分析除灰色关联分析外,还包括灰色聚类和灰色统计评估等方面的内容。

灰色模型按照五步建模思想构建,通过灰色生成或序列算子的作用弱化随机性,挖掘潜在的规律,经过差分方程与微分方程之间的互换实现了利用离散的数据序列建立连续的动态微分方程的新飞跃。

灰色预测是基于 GM 模型作出的定量预测,按照其功能和特征可分成数列预测、区间预测、灾变预测、季节灾变预测、波形预测和系统预测等几种类型。

灰色组合模型包括灰色经济计量学模型(G-E)、灰色生产函数模型(G-C-D)、灰色马尔可夫模型(G-M)、灰色时序组合模型等。

灰色决策包括灰靶决策、灰色关联决策、灰色统计、聚类决策、灰色局势决策和灰色层次决策等。

灰色优化技术包括灰色线性规划、灰色非线性规划、灰色整数规划和灰色动态规划等。

灰色投入产出则是以灰色投入产出优化模型为核心的方法体系。

灰色博弈模型包括基于纯策略的灰矩阵博弈模型和基于混合策略的灰矩阵博弈模型等。

灰色控制的主要内容包括本征性灰色系统的控制问题和以灰色系统方法为构成的控制,如灰色关联控制和 GM(1,1)预测控制等。

根据读者反馈的信息,并注意吸收作者课题组和国内外同行的最新研究成果,本书第三版对第二版作了较大改写,其中基于纯策略的灰矩阵博弈模型和基于混合策略的灰矩阵博弈模型两章则是全新的。

1.3 灰数及其运算

一、灰数

灰色系统用灰数、灰色方程、灰色矩阵等来描述,其中灰数是灰色系统的基本“单元”或“细胞”。

我们把只知道大概范围而不知其确切值的数称为灰数。在应用中,灰数实际上指在某一个区间或某个一般的数集内取值的不确定数。通常用记号“ \otimes ”表示灰数。

灰数有以下几类:

(1) 仅有下界的灰数

有下界而无上界的灰数记为 $\otimes \in [a, \infty)$ 或 $\otimes(a)$,其中 a 为灰数 \otimes 的下确界,它是一个确定的数。我们称 $[a, \infty)$ 为 \otimes 的取数域,简称 \otimes 的灰域。

一棵生长着的大树,其重量便是有下界的灰数,因为大树的重量必大于零,但不可能用一般手段知道其准确的重量,若用 \otimes 表示大树的重量,便有 $\otimes \in [0, \infty)$ 。

(2) 仅有上界的灰数

有上界而无下界的灰数记为 $\otimes \in (-\infty, \bar{a}]$ 或 $\otimes(\bar{a})$,其中 \bar{a} 是灰数 \otimes 的上确界,是确定的数。

一项投资工程,要有个最高投资限额,一件电器设备要有个承受电压或通过电流的最高临界值。工程投资、电器设备的电压、电流容许值都是有上界的灰数。

(3) 区间灰数

既有下界 a 又有上界 \bar{a} 的灰数称为区间灰数, 记为 $\otimes \in [a, \bar{a}]$ 。

海豹的重量在 60~85 公斤之间, 某人的身高在 1.8~1.9 米之间, 可分别记为

$$\otimes_1 \in [60, 85], \quad \otimes_2 \in [1.8, 1.9]$$

(4) 连续灰数与离散灰数

在某一区间内取有限个值或可数个值的灰数称为离散灰数, 取值连续地充满某一区间的灰数称为连续灰数。

某人的年龄在 30 到 35 岁之间, 此人的年龄可能是 30, 31, 32, 33, 34, 35 这几个数, 因此年龄是离散灰数。人的身高、体重等是连续灰数。

(5) 黑数与白数

当 $\otimes \in (-\infty, +\infty)$ 时, 即当 \otimes 的上、下界皆为无穷时, 称 \otimes 为黑数。

当 $\otimes \in [a, \bar{a}]$ 且 $a = \bar{a}$ 时, 称 \otimes 为白数。

为讨论方便, 我们将黑数和白数看成特殊的灰数。

(6) 本征灰数与非本征灰数

本征灰数是指不能或暂时还不能找到一个白数作为其“代表”的灰数, 比如一般的事前预测值、宇宙的总能量、准确到秒或微秒的“年龄”等都是本征灰数。

非本征灰数是指凭先验信息或某种手段, 可以找到一个白数作为其“代表”的灰数。我们称此白数为相应灰数的白化值, 记为 \otimes , 并用 $\otimes(a)$ 表示以 a 为白化值的灰数。如估计某人的托福考试成绩可能在 600 分左右, 可将 600 作为该考生托福考试成绩 $\otimes(600)$ 的白化数, 记为 $\otimes(600) = 600$ 。

从本质上看, 灰数又可以分为信息型、概念型和层次型三类。

(1) 信息型灰数

因暂时缺乏信息而不能肯定其取值的数。如: 预计某地区今年夏粮产量在 100 万吨以上, $\otimes \in [100, \infty)$; 估计某储蓄所年底居民储蓄存款余额将达 7 000 万到 9 000 万元, $\otimes \in [7\ 000, 9\ 000]$; 预计南京地区 5 月份最高气温不超过 36°C , $\otimes \in [0, 36]$ 。这些都是信息型灰数。由于暂时缺乏信息, 不能肯定某数的确切取值, 而到一定时间后, 通过信息补充, 灰数可以完全变白, 如上述三个灰数, 一旦预言的时间终了, 就会变成完全确定的数。

(2) 概念型灰数也称意愿型灰数

由人们的某种观念、意愿形成的灰数。如: 某高校承担一项国家重点科技攻关课题, 希望科研经费投入不低于 3 000 万元, 并且越多越好, $\otimes \in [3\ 000, \infty)$; 某工厂废品率为 1%, 希望大幅度降低, 当然越小越好, $\otimes \in [0, 0.01]$ 。这些都是概念型灰数。

(3) 层次型灰数

由层次改变形成的灰数。有的数, 从系统的高层次, 即宏观层次、整体层次或

认识的概括层次上看是白的;可到低层次上,即到系统的微观层次、分部层次或认识的深化层次则可能是灰的。例如,一个人的身高,以厘米为单位度量是白的,若精确到万分之一微米就成灰的了。有的数,在某个小范围内是白的,在大范围内就成灰的了。例如叫张三的人,某个学校只有 1 人,全市大学有 4~6 人, $\otimes \in [4, 6]$ 已是灰数;若在全国范围内考虑,就更加说不清了。

二、区间灰数的运算

设有灰数 $\otimes_1 \in [a, b]$, $a < b$; $\otimes_2 \in [c, d]$, $c < d$, 用符号 $*$ 表示 \otimes_1 与 \otimes_2 间的运算, 若 $\otimes_3 = \otimes_1 * \otimes_2$, 则 \otimes_3 亦应为区间灰数, 因此应有 $\otimes_3 \in [e, f]$, $e < f$, 且对任意的 \otimes_1, \otimes_2 ,

$$\otimes_1 * \otimes_2 \in [e, f]$$

法则 1.3.1 设 $\otimes_1 \in [a, b]$, $a < b$; $\otimes_2 \in [c, d]$, $c < d$, 则 \otimes_1 与 \otimes_2 的和记为 $\otimes_1 + \otimes_2$, 且

$$\otimes_1 + \otimes_2 \in [a + c, b + d] \quad (1.3.1)$$

例 1.3.1 设 $\otimes_1 \in [3, 4]$, $\otimes_2 \in [5, 8]$, 则 $\otimes_1 + \otimes_2 \in [8, 12]$ 。

法则 1.3.2 设 $\otimes \in [a, b]$, $a < b$, 则

$$-\otimes \in [-b, -a] \quad (1.3.2)$$

法则 1.3.3 设 $\otimes_1 \in [a, b]$, $a < b$; $\otimes_2 \in [c, d]$, $c < d$, 则

$$\otimes_1 - \otimes_2 = \otimes_1 + (-\otimes_2) \in [a - d, b - c] \quad (1.3.3)$$

例 1.3.2 设 $\otimes_1 \in [3, 4]$, $\otimes_2 \in [1, 2]$, 则

$$\otimes_1 - \otimes_2 \in [3 - 2, 4 - 1] = [1, 3], \text{ 或 } \otimes_2 - \otimes_1 \in [1 - 4, 2 - 3] = [-3, -1]$$

法则 1.3.4 设 $\otimes \in [a, b]$, $a < b$, $a \neq 0$, $b \neq 0$, $ab > 0$, 则

$$\otimes^{-1} \in \left[\frac{1}{b}, \frac{1}{a} \right] \quad (1.3.4)$$

例 1.3.3 设 $\otimes \in [2, 4]$, 则 $\otimes^{-1} \in [0.25, 0.5]$ 。

法则 1.3.5 设 $\otimes_1 \in [a, b]$, $a < b$; $\otimes_2 \in [c, d]$, $c < d$, 则

$$\otimes_1 \cdot \otimes_2 \in [\min\{ac, ad, bc, bd\}, \max\{ac, ad, bc, bd\}] \quad (1.3.5)$$

例 1.3.4 设 $\otimes_1 \in [3, 4]$, $\otimes_2 \in [5, 10]$, 则

$$\otimes_1 \cdot \otimes_2 \in [\min\{15, 30, 20, 40\}, \max\{15, 30, 20, 40\}] = [15, 40]$$

法则 1.3.6 设 $\otimes_1 \in [a, b]$, $a < b$; $\otimes_2 \in [c, d]$, $c < d$, 且 $c \neq 0$, $d \neq 0$, $cd > 0$, 则 $\otimes_1 / \otimes_2 = \otimes_1 \cdot \otimes_2^{-1}$, 即

$$\otimes_1 / \otimes_2 \in \left[\min\left\{ \frac{a}{c}, \frac{a}{d}, \frac{b}{c}, \frac{b}{d} \right\}, \max\left\{ \frac{a}{c}, \frac{a}{d}, \frac{b}{c}, \frac{b}{d} \right\} \right] \quad (1.3.6)$$

例 1.3.5 $\otimes_1 \in [3, 4]$, $\otimes_2 \in [5, 10]$, 则