

博士丛书

模糊随机 动力系统理论

张跃 王光远 著

科学出版社

(京) 新登字 092 号

内 容 简 介

本书系统地论述了作者近年来在模糊复分析、模糊随机过程论、模糊随机系统理论等方面的研究成果,并且初步地建立了模糊随机动力系统的理论框架。书中前6章为建立模糊随机动力系统理论的需要,分别介绍了研究的实际背景和思想方法、复模糊集合论、模糊复分析、模糊随机变量理论、模糊随机过程论和模糊微分方程的基本内容,第7章论述了模糊随机系统理论,第8章以高度的一般性论述模糊随机动力系统的反应分析理论,第9、10章则在这一理论框架下分别研究离散线性模糊随机动力系统的反应和结构模糊随机地震反应,最后一章介绍了在模糊复分析、模糊随机过程论、模糊随机系统理论、模糊随机动力系统理论和模糊量子力学等研究领域中的发展趋势。

本书可供从事力学、数学、航空、机械、土木及海洋工程、系统工程和系统科学等方面的科技人员以及有关专业的高年级大学生、研究生、教师阅读和参考。

博 士 公 书 模糊随机动力系统理论

张跃 王光远 著

责任编辑 林鹏

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1993年12月第一版 开本:850×1168 1/32

1993年12月第一次印刷 印张:9 1/8

印数:1—2 000 字数:217 000

ISBN 7-03-003982-3/O·696

定 价 : 9.50 元

序

环顾当今世界，国家的发达，民族的振兴，无一例外地离不开科学技术的推动作用。年轻博士们历来是科技队伍中最活跃、最富创造性的生力军。他们的科研成果是学科发展强有力的推动力量，是体现一个国家高层次教育水平和科研水平的窗口。为了系统地反映年轻博士们的科研成果，促使他们的快速成长，加强国际国内的学术交流，在老一辈科学家的热心支持下，科学出版社决定出版一套《博士丛书》。

我们指导思想是突出本丛书的学术性、创造性、新颖性、先进性和代表性，使之成为所有青年博士平等竞争的学术舞台和优秀科研成果的缩影。

这套丛书以专著为主，并适时组织编写介绍学科最新进展的综述性著作。它将覆盖自然科学各个领域，是一套充分体现我国青年学者科研成果和特色的丛书。

丛书编委会将在由著名科学家组成的专家委员会指导下开展编辑工作。本丛书得到了国家自然科学基金委员会和全国博士后管理协调委员会的特别资助。在此我们深表谢意。

《博士丛书》编委会
一九九三年十月

《博士丛书》专家委员会

王 元	王 仁	母国光	庄逢甘
庄 毅	刘西拉	沈克琦	汪培庄
李 未	肖纪美	谷超豪	张存浩
陈述彭	张光斗	郝柏林	赵忠贤
唐敖庆	郭慕孙	高景德	高为炳
谈德颜	阎隆飞	谢希德	路甬祥

《博士丛书》编委会

名誉主编	卢嘉锡	钱伟长		
副主编	白春礼	刘增良		
常务编委	王晋军 屠鹏飞	尤政	邬伦	林鹏
编委	王世光 冯恩波 刘增良 许文 杨国平 熊夏辛	王晋军 冯守华 安超 宋岩 林鹏	王颢安 白春礼 乔利杰 张新生 周文俊	尤政 白硕 邬伦 汪屹华 屠鹏飞

作 者 序

在现实世界中,一切已存在的或已发生的具体事物,不管它们如何复杂,甚至不能用具体尺度来度量,都有其自在性和规定性,因而都是确定性的,没有任何含混的余地。

但是在人们进行决策和规划时,处理的对象往往是未来的事物,而决策中又离不开人们的认识和经验,因而常常存在一些不确定性的因素和信息。

未来事物受很多偶然因素的影响,因果关系很复杂,一般根据现有信息不可能完全确知未来事物的结果和进程。这种不确定性称为随机性。当事物一出现(试验完成),即转化为确定性事物。统计学(概率论、数理统计和随机过程理论)和决策论给予了我们考虑事物随机性的强有力的工具。

前面已经说到,客观世界中已存在的和已发生的事物都是确定性事物,但是,对某些确定性的事物,人脑所把握的信息却可能是模糊的。例如,人的面孔本身没有任何不确定性,但是,即使在他(她)爱人的头脑里储存的有关信息也是模糊的,不存在任何定量的确定性的数据。可是,人们却可以根据这种模糊信息明确无误地识别出自己所认识的人。

目前可以数学处理的模糊性事物是比较简单的,概括起来说,目前人们所考虑的事物的模糊性,主要是指由于不可能给某些事物以明确的定义和评定标准而形成的不确定性。这时人们考虑的对象往往可以表现为某些论域上的模糊集合。

1965年 L. A. Zadeh 提出的模糊集合是对经典集合的拓广,由于它触动了近代数学的基石——集合的概念,所以模糊数学必将拓广数学的所有分枝。

1990年我们研究了另一种不确定性信息及其数学处理方法。

这是因为在长期的研究工作中,我们发现有些决策问题所研究和处理的某些因素和信息可能即无随机性又无模糊性,但是决策者纯粹由于条件的限制而对它认识不清,也就是说,所掌握的信息不足以确定事物的真实状态和数量关系。我们称这种纯主观的、认识上的不确定性信息为“未确知信息”。未确知信息一般可以采用主观隶属度分布估计和主观概率分布估计来处理。

主观概率分布和主观隶属度分布虽然在概念上有所区别,但他们在本质上却非常接近,概括来说,它们都是人们对某一未确知事件的各种可能情况或可能取值为真的概率的主观估计;也就是决策者本人的经验、直觉,有限的信息等因素在该人心目中所产生的信任程度的比例分配,因此,可以把主观概率和主观隶属度统一为“信比”,信比在论域上的分布可称为“信比分布”。

根据以上所述,我们可以把不确定性信息分为强不确定性信息和弱不确定性信息二类:随机性和模糊性是强不确定性信息;未确知性是弱不确定性信息,未确知性的“弱”表现在两方面。首先,当未确知性与随机性和模糊性共存时,它就可以被后二者所掩盖或包含;其次,当未确知性单独存在时,它可以用主观概率和主观隶属度来描述,也就是采用随机性和模糊性的表达方式来表示。这样,未确知信息的数学处理就得到了极大的简化。甚至在建立理论和具体方法时,在数学形式上就可以只考虑随机性和模糊性,在表达形式上不出现未确知性,而并不妨碍我们用这样的理论和方法解决具有未确知信息的问题。

十多年来我们一直在研究如何正确处理工程问题中的各种不确定性因素和信息。首先我们于1982年提出了地震烈度的模糊综合评定的方法;接着于1984年提出了结构模糊优化设计理论,以后发展为结构软设计理论,相应的在数学上建立了模糊随机规划的一般性解法;1989年提出了工程大系统的全局性优化理论;1990年建立了结构维修理理论的框架。这些开创性的工作为全面地建立工程软设计理论奠定了基础。1990年以前在这个领域的工作

已总结为专著《工程软设计理论》(科学出版社,1992)。目前这个理论仍在继续研究和发展中。

另一方面,从1983年开始,我和我的博士研究生欧进萍一起努力地从事于结构模糊随机振动理论的开拓性研究工作。首先我们把地震时的地面运动模拟为具有模糊参数的随机过程,也就是说在这种随机过程的频谱密度中包含有模糊参数,它们分别代表地震烈度和场地分类这两种模糊因素。这样,在1985年就建立了抗震结构的模糊随机振动理论。

具有模糊参数的随机过程是一种最简单的模糊随机过程。失去模糊性时它蜕化为随机过程,但失去随机性时,模糊性将无所依托。这时的模糊性将如何表现?这个问题困扰了我两年,最后我发现要想解决这个理论问题,还必须把集合的概念加以拓展。

不论经典集合还是模糊集合都是静态的,只要涉及到模糊过程就需要把集合的概念推向动态。所以,1987年我们提出了“动态模糊集合”的概念。这就为“模糊随机过程论”、“模糊随机振动理论”和“模糊随机动力系统理论”的研究开拓了道路。

从此,在我的指导下欧进萍博士和张跃博士先后从两个不同的角度分别对“模糊随机过程论”、“模糊随机振动理论”和“模糊随机动力系统理论”开展了研究工作。

欧进萍建立“模糊随机振动理论”的工作是分为两步进行的。第一步是建立动态模糊响应分析的基本理论。在仅考虑动态系统(包括振动系统)及其环境干扰的模糊性的基础上,先定义了动态模糊集合,研究了它的函数生成集;然后定义了模糊过程,构造了它的 Fuzzy 样本函数。并以 Fuzzy 样本函数为基础建立了模糊过程的 a. f. s 微积分理论,提出了模糊微积分方程的基本解法;最后,提出了动态系统的模糊干扰模拟及其响应和可靠性分析的方法。这一部分工作基本上建立了模糊振动及所必需的数学基础的理论框架。第二步是建立动态模糊随机响应分析的基本理论。在同时考虑动态系统(包括振动系统)及其环境干扰的模糊性和随机

性的基础上,先研究了模糊随机变量及其概率特征;然后定义了动态模糊随机集并以此作为变量取值的限制。定义了模糊随机过程,构造了模糊随机过程的 Fuzzy 样本函数。证明了模糊随机过程的可能性分布函数和样本函数分别是二元和一元随机函数,这样模糊随机过程的模糊特征和概率特征就易于把握了;最后,以 Fuzzy 样本函数为基础,提出了模糊随机微分方程的基本解法,建立起了模糊随机振动及所必需的数学基础的理论框架。

以上工作的基本途径是以动态模糊集合和模糊随机集合以及有关的 Fuzzy 样本函数为基础,研究和解决模糊过程、模糊随机过程、模糊微分方程和模糊随机微分方程的问题。从而建立起动态模糊和模糊随机响应(包括模糊振动和模糊随机振动)分析的基本理论。

1988 年,张跃开始对“模糊随机过程论”和“模糊随机动力系统理论”进行研究。首先,他从引入复模糊集合与复模糊数的基本概念着手,研究了复模糊集合论这一新研究领域中的一些基本概念和结论。如模糊复集合与模糊复数、复模糊集合与复模糊数、圆楔形复模糊数及其运算,复模糊集合的分解定理、表现定理和扩展原理等。接着,在复模糊集合论的基础上,研究了取值于复模糊数的函数,即所谓复模糊集值映射的复分析方法。其次,从测度论的观点出发,给出可测实模糊集值函数、可测复模糊集值函数和 n 维可测实(或复)模糊集值函数的统一定义。结合模糊 σ -代数讨论可测模糊集值函数及其逆模糊集值函数的基本性质。将模糊随机变量看成是可测模糊集值函数的特殊情形,并引入了复模糊随机变量及其分布函数,落影分布函数、数学期望、方差,复模糊随机向量及其数学期望、协方差、独立性等基本概念,讨论和研究了实(或复)模糊随机变量的分析运算、实(或复)模糊随机变量的模糊概率特征、模糊随机向量的模糊概率特征和独立性的基本性质以及计算方法。给出了模糊随机函数的一般定义,并研究了模糊随机函数的可分性、可测性和连续性。从而,建立了模糊随机过程的一般理

论。在此基础上,还研究了两种特殊模糊随机过程类:正态模糊随机过程和平稳模糊随机过程及其谱分解的基本性质。给出了模糊随机系统的一般定义,建立了离散模糊随机系统分析理论。这一研究领域的工作已总结为我和张跃合作撰写的专著《模糊随机过程论》(已精选入我国首批“模糊数学丛书”,1994年即将出版)。随后,在模糊随机过程论以及模糊随机系统理论的基础上,研究了线性动态系统对模糊随机干扰的反应以及在模糊随机干扰下单自由度系统和多自由度系统的反应分析等基本问题,并提出了线性单自由度模糊随机动力系统和多自由度模糊随机动力系统在地震作用下的模糊随机反应分析的一般方法。建立了模糊随机动力系统的理论框架。

欧进萍和张跃从两个不同的角度分别对“模糊随机过程论”、“模糊随机振动理论”和“模糊随机动力系统理论”进行了研究,各自建立了相应的理论。作为博士丛书,本书只介绍了张跃博士论文中有关“模糊随机动力系统理论”方面的内容。关于我和欧进萍的工作将另写专著《模糊随机振动理论》发表。

动态模糊集合、模糊随机过程论、模糊随机振动理论和模糊随机动力系统理论的提出,不仅具有重大的理论意义,还将有广阔的应用前景。但我们提出的这些理论目前仍具有初创的性质,有待进一步的提高和完善,特别是在应用方面还有待各领域的广大科学技术工作者的开拓和钻研。本书涉及的面较宽,且有一定的深度,由于我们知识的局限性,不妥之处在所难免,深望广大读者不吝赐教。

王光远

1993年9月于哈尔滨

前 言

大量实际问题都涉及到对受环境不确定性干扰的系统的分析和设计,这类不确定性干扰可由不同的源产生。一种干扰源是由于条件不充分,使得在条件与事件之间不能出现确定性因果关系,从而在事件的出现与否上表现出的不确定性,这种不确定性称为随机性。另一种干扰源是事物的差异在中间过渡时所呈现的亦此亦彼性,这种不确定性称为模糊性。第三种干扰源是模糊性干扰和随机性干扰同时作用于系统时所产生的不确定性,这种不确定性称为模糊随机性。

众所周知,概率论的产生把数学应用范围从必然现象扩大到偶然现象的领域,模糊数学的产生则提供了把数学的应用范围从精确现象扩大到模糊现象的可能性。把概率论与模糊数学结合起来,同时处理随机性和模糊性,这是近年来概率论与模糊数学发展的一个新动向。

从 1982 年开始,我们一直在研究如何正确处理工程系统中的各种不确定性因素和信息。通过对确定性系统、随机系统和模糊系统的共同特性以及它们之间的联系进行分析和研究,发现各种系统理论之间的关系和它们赖以建立的数学基础可用图 1 来表示。图中箭头的指向表示所必需的基础。

从图 1 我们很容易看出,模糊系统理论和随机系统理论是建立在确定性系统理论基础上的两套互相独立和平行的系统理论,前者用于解决具有模糊性因素的系统问题,后者用于解决具有随机性因素的系统问题。而模糊随机系统理论则是建立在模糊系统理论和随机系统理论基础之上的更高层次的系统理论,它用于解决同时含有模糊性因素和随机性因素的系统问题。在航空、海洋、机械、土建等工程领域以及疲劳、可靠性分析和范围更广的动态系统,如人机系统、管理系统、经济系统、社会系统等中,也都存在类

似的含有模糊随机性因素的系统问题。我们认为很有必要建立严格的模糊随机系统理论。

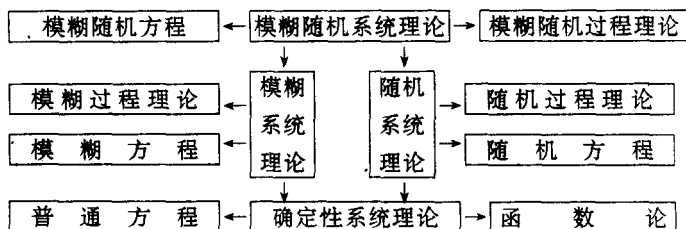


图1 各种系统理论之间的关系和赖以建立的数学基础的示意图

因此,我们对复模糊集合论、模糊复分析、模糊随机方程、模糊随机过程论和模糊随机系统理论开展了一系列的理论研究,初步建立了处理模糊随机性因素和信息的数学理论框架。本书在这一理论框架下,从力学和工程系统问题的实际出发,提出了模糊随机动力系统理论。

本书的宗旨是力图将我们在这方面的研究成果进行逻辑概括,试图用测度论的观点,论述模糊随机过程论和模糊随机动力系统理论的基本内容,并且采用了一套封闭的术语和符号系统,以便读者阅读和理解。

本书第1章介绍了研究的实际背景和思想方法。第2章论述了复模糊集合论的基本概念及结论。第3章给出了模糊复分析方法。第4章与第5章为模糊随机变量理论与模糊随机过程论,目的在于介绍模糊随机动力系统所涉及的一些基本概念。第6章研究模糊微分方程的时域与频域解法。第7章给出了模糊随机系统的一般定义,并建立了离散模糊随机系统理论。第8章论述模糊随机动力系统的反应分析理论。第9章提出了线性模糊随机动力系统反应分析的方法。第10章给出了结构模糊随机地震反应分析的方法。最后一章列举了今后在模糊复分析、模糊随机过程理论、模糊随机系统理论、模糊随机动力系统理论和模糊量子力学等五个

研究领域可进一步研究的课题。

在本书即将出版之际,我们首先要感谢北京师范大学的王梓坤教授、汪培庄教授、罗承忠教授,西安交通大学的张文修教授,他们的著作《随机过程论》、《模糊集与随机集落影》、《模糊集引论》、《集值测度与随机集》是本书的主要参考书。

感谢北京大学的王仁教授、哈尔滨工业大学的黄文虎教授和河北煤炭建筑工程学院院长倪天智教授对本书的关注和支持。

本书承蒙罗承忠教授审阅,他提出了许多宝贵的意见,作者非常感激。

此外,还要感谢宿芬同志,她参与了本书部分内容的研究和讨论,并使用微机为本书排版付出了大量辛勤的劳动。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金、中国煤炭科学基金和中国博士后科学基金的资助,特此致谢。

还应该指出,本书只是对模糊随机动力系统理论的初步探索,还有待于进一步补充、完善和提高。因此,作者以感激的心情,迫切地希望读者对我们的研究工作提出宝贵的意见和建议,更希望能积极参与研究,使其日臻成熟。

作者

1993年3月于哈尔滨

Abstract

Fuzzy stochastic phenomena as well as fuzzy stochastic dynamic system problems exist widely in reality, and far exceed the field that the classical probability methods can be applied. Therefore, it is a urgent subject to establish the theory describing the developing procedure of fuzzy stochastic phenomena and construct the effective methods solving the problems of fuzzy stochastic dynamic systems.

In the book we set up rigorous theory of fuzzy stochastic processes and fuzzy stochastic dynamic systems, achieving the following results:

1. Methods of Fuzzy Complex Analysis Is Brought Forward.

(1) The definitions of fuzzy complex set and fuzzy complex number is given, and some properties of them are discussed.

(2) It is the first time that the basic concepts of complex fuzzy set and complex fuzzy number are introduced, and closure under the basic operations of complex fuzzy sets, complex fuzzy numbers and that their basic operations may be performed in terms of α level complex sets are proved.

(3) The decomposition theorem and representation theorem of complex fuzzy sets proved successfully in the book constructs a theoretical bridge between complex fuzzy sets and classical complex sets.

(4) In this book we investigate the representation forms of the extension principles and multi-variale extension principles of complex fuzzy sets, and provides a general method for extending non-fuzzy mathematical concepts to treat complex fuzzy quantity.

(5) Some fundamental properties of four arithmetic operations, such as intersection and union operation, supremum, infimum as well as superior limit, inferior limit and limit operation of bounded closed complex fuzzy numbers, are studied.

(6) The concept of fuzzy set-valued function is extended to complex fuzzy set-valued function, in addition, some properties of them are discussed.

(7) On the basis of extending the concepts of the derived function, primitive function and integration of interval-valued function to complex interval-valued function and using the decomposition theorem of complex fuzzy set, the derived function, primitive function and integration of complex fuzzy set-valued function are introduced and some properties of them are proved.

The fuzzy complex analysis method advanced by the book provides a effective tool for establishing the theory of fuzzy stochastic processes and fuzzy stochastic dynamic systems.

2. The Theory of Complex Fuzzy Random Variables are Constructed.

(1) From the point of view of measure theory, we give the unified definitions of measurable real (or complex) fuzzy set-valued function and n -dimensional measurable real (or complex) fuzzy set-valued function, and discusses the fundamental properties of them and

their invers fuzzy set-valued function by combining with fuzzy σ -algebra.

(2) By regarding fuzzy random variables as the particular case of measurable fuzzy set-valued functions and systematizing the achieved results, opening further up the study, the book introduces the concepts of complex fuzzy random variable, the distribution function and fall-shadow distribution function of complex fuzzy random variable, and investigates their fundamental properties.

(3) The basic properties and computational methods of fuzzy probability characteristic such as the expectation and variance of real (or complex) fuzzy random variables are studies, and some properties of the independence and analysis operations of real (or complex) fuzzy random variables are discussed.

(4) The concepts of expectation, covariance and independence of real (or complex) fuzzy random vectors are put forward, and their properties are proved.

As metioned above, the construction of complex fuzzy random variable theory lays a foundation for the further research on fuzzy stochastic processes.

3. Theory of Fuzzy Shochastic Processes Is Founded

(1) Based on real (or complex) fuzzy random variables and vectors, the book introduces the concepts of real (or complex) fuzzy stochastic function and n-dimensional joint distribution function, joint fall-shadow distribution function of real (or complex) fuzzy stochastic function as well as real(or complex) fuzzy stochastic process vector

and discusses their properties.

(2) Some fundamental properties of fuzzy probability characteristic, such as the fuzzy mean value function, fuzzy covariance function and fuzzy variance function of fuzzy stochastic processes, are proved.

(3) The application of normal fuzzy stochastic processes and stationary fuzzy stochastic processes to engineering are very attractive, this two kind of fuzzy stochastic processes and their properties are studies, and the spectral decomposition theory of fuzzy correlation functions of stationary fuzzy stochastic processes are advanced and that normal fuzzy stochastic processes can be determined by their two order fuzzy statistical quantity and their linear operations are closure is proved.

The setting up of the theory of fuzzy stochastic processes provides the theoretical basis for going further into fuzzy stochastic systems and fuzzy stochastic dynamic systems.

4. Time Domain And Frequency Domain Solving Processes for Fuzzy Differential Equations Are Advanced.

(1) The solving processes of time domain and frequency domain for n -order linear fuzzy differential equations are given.

(2) The solving processes of time domain and frequency domain for system of one order non-homogeneous fuzzy differential equations are brought forward.

The works provides a indispensable mathematical tool for setting