

国家地震局杭州干部培训中心继续教育教材

# 模糊地震学

—模糊数学在地震科学中的应用

冯德益 林命周 顾瑾平 蒋 淳 虞雪君 著



地震出版社



国家地震局杭州干部培训中心继续教育教材

# 模 糊 地 震 学

——模糊数学在地震科学中的应用

冯德益 林命周 顾瑾平 著  
蒋 淳 虞雪君

(京)新登字095号

## 内 容 提 要

模糊地震学是近年发展起来的地震学的一个新的分支。本书以作者的研究成果为主体,全面介绍了模糊地震学的主要研究成果。全书分为七章。第一章为绪论。第二章简要介绍了模糊数学的常用方法。第三至六章分别介绍了模糊数学在地震预报、地震工程、地震对策及其他地震学领域内的应用,是本书的基本部分。最后,第七章中给出了模糊数学与其他相关理论,包括统计理论、分形理论、灰色系统理论及神经网络理论等在地震研究中的综合应用。

本书是模糊地震学的第一本专著,可供地震学、地震勘探学、地球物理学、应用数学及工程学等部门的科技工作者和大专院校有关专业师生们参考使用。

## 模 糊 地 震 学

——模糊数学在地震科学中的应用

冯德益 林命周 顾瑾平 著  
蒋 淳 虞雪君

责任编辑:李 俊

版式设计:耿 艳

---

地震出版社出版

北京民族学院南路9号

一二〇一工厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

---

850 × 1168 1/32 9.375印张 250千字

1992年7月第一版 1992年7月第一次印刷

印数 0001—1300

ISBN 7-5028-0578-8/P·389

(967) 定价: 6.50元

# 前 言

近十年来,中国、日本、美国和其他一些国家的科技人员经过长期研究,已把模糊集理论,即模糊数学应用到包括地震预报、地震工程和地震对策在内的地震科学的各个不同领域当中。在所得结果的基础上形成了地震学的一个新的分支,可称为模糊地震学。

本书主要作者从1978年以来一直从事模糊数学在地震科学的各个领域的应用研究工作,特别是在地震预报研究方面做了大量工作。至今已获得大量的研究成果,先后在国内外发表了70余篇学术论文。这些研究成果曾多次在国家地震局杭州干部培训中心的干部培训班上介绍与推广。本书就是在1990年4月国家地震局杭州干部培训中心举办的《模糊数学在地震研究中的应用》培训班讲授教材的基础上充实写出的。

本书旨在全面介绍模糊地震学的主要研究成果。书中除以绝大部分篇幅重点介绍作者的研究成果之外,也简要地介绍了国内其他同行们的有关研究成果,猎取的内容比较深入、完善而新颖。全书分为七章。第一章为综述模糊地震学概貌的概论。第二章简要介绍了模糊数学的常用方法。第三章至第六章分别介绍了模糊数学在地震预报,地震工程,地震对策及其他地震学领域内的应用,是本书的基本部分。最后,第七章中给出了模糊数学与其他相关理论,包括统计理论,分形理论,灰色系统理论及神经网络理论等在地震研究中的综合应用。

本书的主要研究工作得到了国家地震局科技监测司和地震科学联合基金会的支持与资助。在研究成果推广及本书的编写与公开出版过程中,得到国家地震局杭州干部培训中心的赞助。此

外，模糊数学创始人，美国加州柏克利大学柴德教授还对本书的出版给以很大的关注和鼓励。我们在此表示深切的谢意！

近年来与我们一道从事过模糊地震学研究的还有陈荣华、郑熙铭、吴国有、刘喜兰、王焕萍等同志以及市川政治、伊藤秀美等先生，本书的部分内容是我们和他们的共同研究成果。

为了全面介绍模糊地震学的研究成果，书中还引用了刘锡荟、王光远等教授以及多位专家学者的部分已发表的论文。由于本书篇幅所限，难免挂一漏万，不当之处，敬请批评指正。

本书既是国内，也是国际上模糊地震学的第一本专著，可供地震学，地震勘探学，地球物理学，应用数学及工程学等部门的科技工作者和大专院校有关专业师生们参考使用。

作 者

1991年4月

# FUZZY SEISMOLOGY: APPLICATIONS OF FUZZY MATHEMATICS IN SEISMOLOGY

Feng Deyi Lin Mingzhou Gu Jinping  
Jiang Chun Yu Xuejun

## Synopsis

In recent years, the scientists and technologists of China, Japan, USA and the other countries have been studying the applications of fuzzy sets theory, so-called fuzzy mathematics in different domains of earthquake researches including earthquake prediction, earthquake engineering and earthquake countermeasures. On the basis of the obtained results it can be formed a new branch of seismology which may be called fuzzy seismology.

This book broadly presents the main contents of fuzzy seismology. It includes 7 chapters. In Chapter 1 a summarized introduction of fuzzy seismology is given. The usually applied methods of fuzzy mathematics are briefly introduced in Chapter 2. In Chapters 3-6 the applications of fuzzy mathematics in different domains of earthquake prediction, earthquake engineering, earthquake countermeasures and the other domains of seismology have been presented separately. They are the basal parts of this book. Finally, some synthetic applications of fuzzy mathematics and the related theories in-

cluding statistical theory, fractal theory, grey system theory and neural network theory in earthquake researches are given in Chapter 7.

This book is the first monograph of fuzzy seismology. It may be useful and referential for scientific and technical workers in the areas of seismology, seismological prospecting, geophysics, applied mathematics and engineering, and for the teachers and students of the related departments in higher learning schools as well.

# 目 录

|                        |         |
|------------------------|---------|
| 第一章 概 论                | ( 1 )   |
| §1.1 模糊地震学的产生与发展       | ( 1 )   |
| §1.2 模糊地震学的主要研究内容与现状   | ( 2 )   |
| §1.3 模糊地震学的新进展         | ( 3 )   |
| 第二章 常用模糊数学方法简介         | ( 6 )   |
| §2.1 模糊模式识别            | ( 6 )   |
| §2.2 模糊聚类分析            | ( 8 )   |
| §2.3 模糊信息检索            | ( 9 )   |
| §2.4 模糊相似选择            | ( 11 )  |
| §2.5 模糊综合评判            | ( 12 )  |
| §2.6 模糊概率              | ( 16 )  |
| 第三章 模糊数学在地震预报中的应用      | ( 19 )  |
| §3.1 基于地震前兆的模糊地震预报     | ( 19 )  |
| §3.2 基于地震活动性的模糊地震预报    | ( 34 )  |
| §3.3 模糊聚类分析方法在地震预报中的应用 | ( 48 )  |
| §3.4 模糊信息检索方法在地震预报中的应用 | ( 57 )  |
| §3.5 模糊综合评判在地震预报中的应用   | ( 64 )  |
| §3.6 地震序列中最大强度余震的模糊估计  | ( 71 )  |
| §3.7 大地震跟踪预报的模糊综合分析方法  | ( 81 )  |
| §3.8 模糊地震预报方法的某些计算程序设计 | ( 87 )  |
| §3.9 地震预报的模糊评分         | ( 107 ) |
| §3.10 模糊地震预报的应用实例      | ( 111 ) |
| 第四章 模糊数学在地震工程中的应用      | ( 118 ) |
| §4.1 地震危险性的模糊分析        | ( 118 ) |

|      |                                   |       |
|------|-----------------------------------|-------|
| §4.2 | 地震烈度的模糊评定·····                    | (126) |
| §4.3 | 地震灾害的模糊估计与预测·····                 | (148) |
| §4.4 | 地震地面效应的模糊评定与分析·····               | (155) |
| §4.5 | 潜在震源区的模糊判定·····                   | (158) |
| §4.6 | 工程抗震的模糊设计·····                    | (163) |
| 第五章  | 模糊数学在地震对策中的应用·····                | (175) |
| §5.1 | 地震损失的模糊评估与预测·····                 | (175) |
| §5.2 | 地震预报的模糊决策·····                    | (183) |
| §5.3 | 多级模糊决策在地震预报对策中的应用·····            | (201) |
| §5.4 | 模糊线性规划在地震对策中的应用·····              | (207) |
| §5.5 | 模糊地震防灾系统工程初探·····                 | (214) |
| 第六章  | 模糊数学在地震研究的其他方面的应用·····            | (221) |
| §6.1 | 模糊数学在震源研究中的应用·····                | (221) |
| §6.2 | 模糊数学在地下介质研究中的应用·····              | (226) |
| §6.3 | 模糊数学在历史地震研究中的应用·····              | (227) |
| §6.4 | 模糊数学在地震地质研究中的某些应用·····            | (233) |
| 第七章  | 模糊数学与其他相关理论方法在地震研究中的<br>综合应用····· | (240) |
| §7.1 | 模糊统计分析在地震研究中的应用·····              | (240) |
| §7.2 | 模糊自相似分析在地震研究中的应用·····             | (244) |
| §7.3 | 模糊分维在地震研究中的应用·····                | (247) |
| §7.4 | 模糊灰色系统理论方法在地震研究中的应用·····          | (259) |
| §7.5 | 模糊神经网络在地震研究中的初步应用·····            | (272) |
| 参考文献 | ·····                             | (278) |

# CONTENTS

|           |                                                                                         |       |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Chapter 1 | INTRODUCTION .....                                                                      | ( 1 ) |
| §1.1      | Appearance and Development of Fuzzy Seismology<br>.....                                 | ( 1 ) |
| §1.2      | Main Research Scopes and General Account of Recent<br>Research on Fuzzy Seismology..... | ( 2 ) |
| §1.3      | New Progress of Fuzzy Seismology.....                                                   | ( 3 ) |
| Chapter 2 | APPLIED METHODS OF FUZZY MATHE-<br>MATICS.....                                          | ( 6 ) |
| §2.1      | Fuzzy Pattern Recognition.....                                                          | ( 6 ) |
| §2.2      | Fuzzy Clustering Analysis.....                                                          | ( 8 ) |
| §2.3      | Fuzzy Information Retrieval.....                                                        | ( 9 ) |
| §2.4      | Fuzzy Similarity Choice.....                                                            | (11)  |
| §2.5      | Fuzzy Multi-Factorial Evaluation.....                                                   | (12)  |
| §2.6      | Fuzzy Probability.....                                                                  | (16)  |
| Chapter 3 | APPLICATIONS OF FUZZY MATHEMATICS<br>IN EARTHQUAKE PREDICTION .....                     | (19)  |
| §3.1      | Fuzzy Earthquake Prediction Based on Earthquake<br>Precursors.....                      | (19)  |
| §3.2      | Fuzzy Earthquake Prediction Based on Seismic<br>Activity .....                          | (34)  |
| §3.3      | Application of Fuzzy Clustering Analysis in<br>Earthquake Prediction .....              | (48)  |
| §3.4      | Application of Fuzzy Information Retrieval in<br>Earthquake Prediction .....            | (57)  |
| §3.5      | Application of Fuzzy Multi-Factorial Evaluation in                                      |       |

|                                                                                             |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Earthquake Prediction.....                                                                  | ( 64 ) |
| §3.6 Fuzzy Evaluation of Largest Aftershock in Earthquake<br>Sequence.....                  | ( 71 ) |
| §3.7 Fuzzy Comprehensive Analysis Method for Tracing<br>Prediction of Large Earthquake..... | ( 81 ) |
| §3.8 Program Designs of Some Fuzzy Methods Applied to<br>Earthquake Prediction.....         | ( 87 ) |
| §3.9 Fuzzy Evaluation of Effectiveness of Earthquake<br>Prediction .....                    | (107)  |
| §3.10 Practical Examples of Fuzzy Earthquake Prediction<br>.....                            | (111)  |
| Chapter 4 APPLICATIONS OF FUZZY MATHEMATICS<br>IN EARTHQUAKE ENGINEERING.....               |        |
| §4.1 Fuzzy Analysis of Earthquake Hazards and Risks<br>.....                                | (118)  |
| §4.2 Fuzzy Evaluation of Earthquake Intensity.....                                          | (126)  |
| §4.3 Fuzzy Assessment and Prediction of Earthquake<br>Disasters .....                       | (148)  |
| §4.4 Fuzzy Evaluation and Analysis of Ground Effects<br>Caused by Earthquake .....          | (155)  |
| §4.5 Fuzzy Evaluation of Potential Earthquake Source<br>Region .....                        | (158)  |
| §4.6 Fuzzy Projection of Anti-Seismic Structures.....                                       | (163)  |
| Chapter 5 APPLICATIONS OF FUZZY MATHEMATICS<br>IN EARTHQUAKE COUNTERMEASURES<br>.....       |        |
| §5.1 Fuzzy Evaluation and Prediction of Losses Caused by<br>Earthquake .....                | (175)  |
| §5.2 Fuzzy Decision-Making of Earthquake Prediction<br>.....                                | (183)  |
| §5.3 Application of Multi-Step Fuzzy Decision-Making in                                     |        |

|                                                                                                                                  |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Earthquake Prediction Countermeasure .....                                                                                       | (201) |
| §5.4 Application of Fuzzy Linear Program in Earthquake<br>Countermeasures .....                                                  | (207) |
| §5.5 Preliminary Study of Fuzzy System Engineering for<br>Prevention of Earthquake Disasters.....                                | (214) |
| Chapter 6 APPLICATIONS OF FUZZY MATHEMATICS<br>IN OTHER DOMAINS OF EARTHQUAKE<br>RESEARCHES .....                                | (221) |
| §6.1 Applications of Fuzzy Mathematics in Earthquake<br>Source Research.....                                                     | (221) |
| §6.2 Applications of Fuzzy Mathematics in Earth Interior<br>Structure Studies.....                                               | (226) |
| §6.3 Applications of Fuzzy Mathematics in Researches of<br>Historical Earthquakes.....                                           | (227) |
| §6.4 Some Applications of Fuzzy Mathematics in Resear-<br>ches of Seismological Geology .....                                    | (233) |
| Chapter 7 SYNTHETIC APPLICATIONS OF FUZZY<br>MATHEMATICS AND RELATED THEORIES<br>AND METHODS IN EARTHQUAKE RE-<br>SEARCHES ..... | (240) |
| §7.1 Application of Fuzzy Statistical Analysis in Earth-<br>quake Researches.....                                                | (240) |
| §7.2 Application of Fuzzy Self-Similarity Analysis in<br>Earthquake Researches .....                                             | (244) |
| §7.3 Application of Fuzzy Fractal Dimension in Earthquake<br>Researches.....                                                     | (247) |
| §7.4 Application of Fuzzy Grey System Theory in Earth-<br>quake Researches.....                                                  | (259) |
| §7.5 Preliminary Application of Fuzzy Neural Network in<br>Earthquake Researches.....                                            | (272) |
| REFERENCES.....                                                                                                                  | (278) |

# 第一章 概 论

## §1.1 模糊地震学的产生与发展

自然界和社会领域存在着许多不确定性的现象。这种不确定性主要表现在两个方面：一是随机性，二是模糊性。随机性是由于事物的因果关系不确定所造成的，常用概率统计方法来进行研究。事物的模糊性，是指其边界不清楚，即在质上没有确切的含义，在量上没有明确的界限。地震学中的模糊现象比比皆是，例如，“大地震”、“前兆异常”、“孕震区”、“地震危险性”、“地震破坏”、“地震损失”……等等。为了描述客观事物的模糊性，美国控制论专家查德于1965年首先提出了模糊集合的概念，给出了模糊现象的定量描述方法和分析运算方法，创建了模糊集理论方法，我国通称为模糊数学。

1980年前后，美籍中国学者傅京生、姚治平，新西兰学者皮克和中国地震工作者冯德益、林命周、顾瑾平与数学工作者楼世博，分别把模糊数学中的某些方法应用于地震工程、地震危险性分析及地震预报与地震孕育过程的研究当中，开创了模糊地震学的几个主要研究方向。稍后，我国地震工程界专家王光远、刘锡荟、刘贞荣与数学界专家汪培庄等致力于模糊数学在地震工程中的应用，取得了一系列重要结果。目前，用模糊集理论方法来研究地震学中的各类问题，已形成地震学的一个新的研究领域，可称为模糊地震学，其含义与理论地震学、实验地震学、计算地震学、数理地震学、定量地震学、仿生地震学……等类似。

近十年来，中、美、日以及其他国家的专家学者们在模糊地震学方面已取得显著研究成果，发表了数以百篇计的学术论文，

不少初步研究成果已在实际地震预报、地震工程与地震对策中试用。1985年9月,由中国国家地震局与中国建筑科学研究院共同在北京组织召开了“地震研究中的模糊数学方法国际学术讨论会”,出版了两卷会议论文集<sup>[122,123]</sup>,对模糊地震学的发展起了很大的促进作用,在国内外有较大的影响。近年来,中、日两国地震工作者在把模糊数学应用于地震预报方面进行了卓有成效的合作研究,取得了双方都相当满意的结果。中国学者王光远、刘锡荟、冯德益、刘贞荣、林命周、顾瑾平等还在美国、苏联、日本等国及国内多次讲学及办培训班,宣讲模糊地震学的成果与进展,促进了模糊地震学的普及和发展。

## §1.2 模糊地震学的主要研究内容与现状

目前,模糊地震学的主要研究内容是用模糊数学中的模糊模式识别、模糊聚类分析、模糊信息检索、模糊相似选择、模糊综合评判、模糊推理、模糊决策、模糊概率、模糊优化、模糊线性规划等多种不同的方法来研究以下几个方面的地震学课题<sup>[42,46,49,55,70,122,123]</sup>:

1. 模糊地震预报研究,即模糊数学方法在地震预报方面的应用;
2. 模糊地震工程研究,即模糊数学方法在地震工程方面,特别是工程地震学方面的应用;
3. 模糊地震对策研究,把模糊数学方法应用到新近发展起来的地震社会学及地震防灾对策研究当中;
4. 模糊地球内部介质研究,把模糊数学方法应用到经典地震学的主要研究内容,即地球内部介质研究当中;
5. 模糊地震震源研究,即把模糊数学方法应用于震源机制及震源参数的测定等方面;
6. 模糊历史地震与古地震研究,即把模糊数学方法应用于

具有明显模糊性质的历史地震与古地震研究方面。

表1.2.1给出当前模糊数学在地震研究中的应用概况。由此表也可以看出模糊地震学的主要研究内容。随着模糊地震学的发展,还会不断出现新的研究方向与研究内容。

这里要补充说明两个问题。第一、我们现在所称的地震学是指包括经典地震学在内的全部地震学研究内容的广义地震学,或称地震科学。因此,模糊地震学也就包含了地震研究各个方面的相应内容。第二、我们所讨论的模糊地震工程方面的研究内容,主要是指模糊数学方法在工程地震学及结构抗震等直接与地震有关的问题中的应用。至于模糊数学在结构工程中的应用,则在70年代初就已开始有人研究<sup>[116,117]</sup>,至80年代初国际上已发表了一系列学术论文,刘锡荟等曾作过专门综述<sup>[61]</sup>。除中国地震学界、建筑工程学界及数学界的科技工作者在把模糊数学应用于地震工程方面取得了显著进展之外,美国同行们也取得了很大进展,而且起步更早,文献[32]简要介绍了他们的某些前期研究结果。

### §1.3 模糊地震学的新进展

模糊地震学研究近一两年又有不少新进展。这里仅举出以下几个值得注意的新的研究方向。

#### 一、模糊分形、分维在地震研究中的应用

地震现象是一种既复杂又带有模糊性的自然现象,因而可以综合应用旨在研究具有自相似结构的复杂现象的分形、分维理论和旨在处理事物模糊性的模糊集理论来研讨。在此基础上已提出模糊分维的概念与方法,并初步试用于地震危险性估计与地震预报研究当中<sup>[49,50,52,54]</sup>。

#### 二、模糊数学与灰色系统理论在地震研究中的综合应用

地震研究中的信息既有随机性和模糊性,也有知识不完备性。灰色系统理论方法主要用于分析处理知识不完备,或内涵不清晰

表1.2.1 模糊数学在地震研究中的应用概观

| 地震研究方向       | 应 用 课 题                                                                                                                                                                                                                                                                            | 所应用的模糊数学方法                                                                                        |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 地震预报         | 1. 基于地震活动性的中长期预报<br>(1) 多指标地震危险区评定与划分<br>(2) 强震前地震活动图象的识别 (空<br>区、条带、集中度、集中-增强度、地震<br>簇等)<br>(3) 单项地震学前兆指标的清晰化<br>(地震活动平静异常识别、高潮时段识<br>别、地震序列自相似性分析等)<br>2. 基于地震前兆的中短期预报 (地<br>震前兆识别与分析)<br>3. 地震综合预报<br>(1) 多指标定区定期震级预报<br>(2) 多因子地震综合预报<br>4. 地震序列类型判别与强余震预报<br>5. 地震预报意见与预报能力评价 | FCA, FIR, FPR, FSC, FDA<br>FSC, FCA, FPR<br>FPR<br>FPR<br>FCA, FIR<br>FME<br>FCA, FSC<br>FDA, FME |
| 震源与介质        | 1. 地下介质结构模型判别<br>2. 活断层活动度评定<br>3. 震源机制确定<br>4. 震源孕育模式评判                                                                                                                                                                                                                           | FSC<br>FPR<br>FME<br>FDA, FME                                                                     |
| 地震工程         | 1. 地震烈度评定<br>2. 震害预测<br>3. 地震地面运动估计<br>4. 场地地震效应分类<br>5. 工程抗震设计<br>6. 潜在震源区判定                                                                                                                                                                                                      | FDA, FME, FPR, FR<br>FME, FCA<br>FP<br>FME<br>FPR, FP, FR<br>FCA, FR                              |
| 历史地震与<br>古地震 | 1. 历史地震烈度评定<br>2. 历史地震震源机制确定<br>3. 古地震遗迹识别                                                                                                                                                                                                                                         | FDA, FME, FPR<br>FPR, FME<br>FPR                                                                  |
| 地震对策         | 1. 地震预报对策<br>2. 地震损失估计<br>3. 地震防灾决策                                                                                                                                                                                                                                                | FDA, FDM<br>FPR, FME<br>FDM                                                                       |

注: FPR——模糊模式识别的直接方法; FCA——模糊聚类分析; FIR——模糊信息检索; FSC——模糊相似选择; FDA——模糊模式识别的间接方法 (贴近度方法); FME——模糊综合评判; FR——模糊推理; FDM——模糊决策; FP——模糊概率 (模糊统计)。

的灰色信息，已开始用于地震研究。据我们的初步分析研究结果，若能同时使用模糊数学方法与灰色系统理论方法，可以提高模糊聚类、模糊模式识别、模糊综合评判等方法的应用效果，而这些方法又是地震研究中的常用方法。文献[53]中已有一些联合应用结果。

### 三、模糊神经网络系统在地震研究中的应用

神经网络系统是近年来新兴的一个高度综合性的科技新研究领域，是在现代神经科学的研究成果的基础上提出来的，反映了人脑功能的若干基本特性。而神经网络系统中大都要用模糊推理等方法，因而是模糊神经网络系统。模糊神经网络系统已开始用于地震学研究，如高木英行提出把人工神经网络驱动型模糊推理和快速神经网络算法用于地震学研究当中，横山博文应用神经网络来从强干扰背景中识别地震波，石成钢等把人工神经元网络驱动的模糊识别算法应用于地震烈度识别。

### 四、模糊专家系统在地震研究中的应用

刘锡荟、董伟民等近年来都在研究适用于工程地震的模糊专家系统，目的是使专家系统能处理工程地震，或者更广泛一些说，地震工程中的模糊信息和模糊推理。刘锡荟等最初研究的一个模糊工程地震专家系统称为“EIEES”，近年来又有发展。董伟民等研究的模糊地震危险性估计专家系统的一部分见文献[118]。中、日地震专家正开始准备研究适用于地震预报的模糊专家系统。

如其他新的地震学分支一样，模糊地震学正在不断蓬勃向前发展。而且，中国地震工作者在国际模糊地震学研究与发展中起到了很重要的作用，在某些方面，如模糊地震预报研究方面，起到了领先作用和主导作用，这一点在日本寺野寿郎、浅居喜代治等多位名教授合著的新书《模糊集理论与应用》（1987年才一出版社出版）中得到肯定。