

核爆地震模式识别

Seismic Pattern Recognition of
Underground Nuclear Explosions

刘代志 李夕海 著



國防工業出版社
National Defense Industry Press

核爆地震模式识别

Seismic Pattern Recognition of
Underground Nuclear Explosions

刘代志 李夕海 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

核爆地震模式识别 / 刘代志, 李夕海著. —北京:
国防工业出版社, 2010. 10

ISBN 978 - 7 - 118 - 07112 - 2

I. ①核... II. ①刘... ②李... III. ①核爆炸 - 爆炸
地震学 IV. ①TL91②P315

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 200340 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 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 19¼ 字数 331 千字

2010 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 65.00 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. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,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 第六届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 宋家树 蔡 镭 程洪彬

秘书长 程洪彬

副秘书长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

前 言

1996年9月联合国通过《全面禁止核试验条约》以后,核爆炸的监测和识别就成为国际核查与反核查的主要内容之一。《全面禁止核试验条约》规定的核查方法有四种:地震、次声、放射性核素和水声测量。核查要解决的首要问题是确定震源的性质,即对核爆炸(地下、水下和空中)和非核爆炸事件(天然地震、化学爆炸等)进行识别。解决地下核爆炸识别问题的关键技术有两类:一是设置尽可能合理的检测台阵;二是利用模式识别技术对测量信号进行识别处理。然而,要解决侦测工程中的一系列目标识别问题,关键是模式识别技术的应用。因此,核爆地震模式识别的方法理论不仅有着广泛的应用前景,而且可以为其他侦察目标识别提供思路与相应的方法技术。

以往的核爆地震模式识别主要采用两类方法:一类是地球物理学的方法,即用震源深度、面波震级比等地球物理特征参数来进行判别;另一类是用统计模式识别方法对地震波进行自动解释,即用复倒谱、频率三次矩、谱比值等数学特征通过各种分类器来进行识别。但是,识别结果尚不理想,以至地震学家得出这样的结论:对于天然地震和地下核爆炸,看来并不存在一个理想的鉴别判据。

我们从1989年开始,采用地球物理与信号处理及模式识别相结合的方法,即采用“灰箱”的方法对核爆炸模式识别中的关键问题展开了深入研究,具体表现在所提取的特征不完全是纯数值特征,而是有一定的地球物理意义,或可以与地震学特征相类比。此外,与传统的统计模式识别方法不同的地方是,我们在特征提取与选择,分类器设计、训练与识别等环节中,引入了分形、混沌等非线性时间序列分析方法和模糊综合评判、人工神经网络、协同学等智能信号处理理论,以及小波分析、时频分析、随机过程等非平稳信号处理方法。

本书共分9章。

第1章是绪论,主要对核爆地震监测与识别,重点是核爆地震监测的研究历史和现状进行评述,介绍了核爆地震波区域特征及传播、源特征研究和核爆地震识别技术。并且为了照顾非地震专业和非信号与信息处理专业的读者(事实上,在核爆地震模式识别领域这两方面的科技工作者都有),本章同时介绍了核

爆地震监测中所涉及的地震波探测的基本知识以及核爆地震识别的传统方法。然后简要介绍了模式识别的基本理论(第2章),从模式识别的基本概念、特征提取与选择和分类器设计三个方面予以介绍。

在模式采集(也即样本集获得)以后,首先要对样本信号进行分析和处理,为后续的特征提取与选择做准备,所以,第3章是核爆地震信号分析与预处理。第3章首先介绍了核爆地震信号的常规处理,然后引入分形与混沌分析,介绍了我们在核爆地震信号的分形分析、基于重采样的混沌序列相空间重构算法、基于相空间相关性和PCA的嵌入维和时间延迟选择算法、基于Gram-Charlier展开的相空间重构时间延迟选择方法等方面的研究工作,最后介绍了数据预处理,主要是我们提出的基于小波包分解及AR模型的初至点检测算法。

在核爆地震信号分析与预处理之后,核爆地震模式识别开始进入关键环节——特征提取与选择。第4章是核爆地震信号的特征提取与选择,这是核爆地震模式识别中最重要、也最有特色的部分。首先介绍了常用的特征提取与选择方法,包括时域特征、频域特征、时频域特征和特征选择方法;然后重点论述了我们提出的基于PCA和KPCA的特征提取方法、基于最佳分类主分量分析的特征提取算法、多分辨率能量分形特征提取算法、基于核非负矩阵分解的特征提取算法、基于类时频特征的特征提取算法、基于序优化的核爆地震特征选择、基于Gamma Test的特征选择以及基于序优化和Gamma Test的特征选择方法。

特征提取与选择完成之后,核爆地震模式识别进入最后环节——分类判别。首先是核爆地震信号的传统判别分析(第5章),除了介绍传统的一维特征空间中的二分法、最近邻法和 K 近邻法等分类器设计外,重点介绍了基于模糊变权 K 近邻方法的分类器设计、基于最小均方误差准则的分类器设计、基于Fisher和KFisher判别的核爆地震模式识别和基于 K 相关的核爆地震模式识别等方法。接着介绍核爆地震信号的非线性判别分析(第6章),核爆地震模式识别研究开始渐入佳境。第6章比较系统地介绍了我们团队提出的基于支持向量机的核爆地震模式识别、基于隐马尔科夫模型的核爆地震模式识别、基于最近邻支持向量特征线融合的核爆地震模式识别、基于核 K 相关的核爆地震模式识别、基于分类器集成的核爆地震模式识别等方法;在吸引子分析与核爆地震模式识别研究中,我们提出了特征相空间的概念,以及吸引域、吸引子、吸引中心的界定和具体计算方法,在此基础上,进一步介绍了特征相空间等价的模型实验研究和核爆地震识别中的特征相空间研究结果。第7章是神经网络在核爆地震模式识别中的应用,介绍了神经网络的基本原理及其在核爆地震模式识别中的应用,重点叙述

了一些改进学习算法的应用研究结果和一种基于辅助样本次优准则的神经网络泛化学习方法。

第8章是协同神经网络与核爆地震分类,开始进入智能模式识别阶段。首先简述了哈肯提出的协同模式识别方法、常用的协同模式识别算法和协同模式识别算法中的关键技术,然后重点介绍了我们提出的基于支持向量样本加权平均的原型模式选择算法、基于模糊 C -均值的原型模式选择算法、变步长的基于奖惩学习机制的注意参数训练算法和基于核函数的协同模式识别方法。

第9章是核爆地震的模糊综合评判,核爆地震模式识别进入高潮。重点介绍了我们在构建核爆地震模式识别系统框架中应用的模糊综合评判方法思路、权向量的构造、单因素评判矩阵和多层次模糊评判方法等内容。

最后,我们提出了一个核爆地震模式识别系统框架,对存在的问题和面临的挑战作了简要分析,对该领域的发展前景进行了展望。

本书是我们团队近20年来从事核爆地震模式识别研究的一次较全面总结,希望能与同行交流学术,增进学问,达到共同提高的目的,为提高我国核爆地震识别技术水平做点贡献。

刘代志
2010年2月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 核爆地震监测	1
1.2 核爆地震监测历史、现状与趋势	3
1.2.1 核爆地震波区域特征及传播	6
1.2.2 源特征研究	9
1.2.3 核爆地震识别技术	11
1.2.4 核爆地震监测的未来发展	23
1.3 核爆地震识别的传统方法	24
1.4 地震波基础知识	32
1.4.1 地震波	34
1.4.2 爆炸激发地震波	37
1.4.3 地震波的运动学特征	43
1.4.4 地震波的动力学特征	46
1.4.5 地震波探测方法与技术	47
1.5 核爆地震数据集	56
参考文献	57
第2章 模式识别的基本理论	66
2.1 基本概念和方法	66
2.1.1 统计模式识别	66
2.1.2 句法模式识别	69
2.1.3 智能模式识别	70
2.2 特征提取与选择	71
2.2.1 特征提取	72
2.2.2 特征选择	72
2.3 分类器设计	74
2.3.1 线性判别函数	75
2.3.2 非线性判别函数	76

2.3.3 其他分类判决	77
参考文献	78
第3章 核爆地震信号分析与预处理	80
3.1 核爆地震信号的常规处理	80
3.2 核爆地震信号的分形与混沌分析	85
3.2.1 核爆地震信号的分形分析	85
3.2.2 基于重采样的混沌序列相空间重构算法	87
3.2.3 基于相空间相关性与 PCA 的嵌入维和时间延迟选择算法	93
3.3 数据预处理	98
3.3.1 事件的检测	98
3.3.2 初至点检测	99
参考文献	106
第4章 核爆地震信号的特征提取与选择	110
4.1 常用的特征提取与选择方法	110
4.1.1 时域特征	110
4.1.2 频域特征	115
4.1.3 时频域特征	116
4.1.4 特征选择方法	118
4.2 基于 PCA 和 KPCA 的特征提取	119
4.3 基于最佳分类主分量分析的特征提取算法	123
4.4 多分辨率能量分形特征提取算法	127
4.5 基于核非负矩阵分解的特征提取算法	129
4.5.1 非负矩阵分解的基本理论	129
4.5.2 基于 NMF 的核爆地震特征提取	131
4.5.3 核非负矩阵分解(KNMF)算法	135
4.5.4 基于 KNMF 的核爆地震特征提取	136
4.6 基于时频分析的特征提取算法	137
4.6.1 时频平面上的谱比值特征和矩特征	138
4.6.2 时频平面上的时频面积特征	139
4.6.3 时频表示的奇异值特征	140
4.7 基于序优化的核爆地震特征选择	140
4.7.1 序优化概述	140
4.7.2 基于序优化的核爆地震特征选择	142
4.8 基于 Gamma Test 的特征选择	144

4.8.1	Gamma Test 理论概述	144
4.8.2	基于 Gamma Test 的核爆地震特征选择	145
4.9	基于序优化和 Gamma Test 的核爆地震特征选择	146
	参考文献	147
第 5 章	核爆地震信号的传统判别分析	150
5.1	一维特征空间中的二分法	150
5.2	基于近邻规则的核爆地震模式识别	150
5.2.1	基于最近邻方法的分类器设计	150
5.2.2	基于 K 近邻方法的分类器设计	151
5.2.3	基于模糊变权 K 近邻方法的分类器设计	151
5.3	基于最小均方误差准则的分类器设计	152
5.4	基于 Fisher 和 K Fisher 判别的核爆地震模式识别	156
5.5	基于 K 相关的核爆地震模式识别	160
5.5.1	K 相关分类原理	161
5.5.2	核爆地震分类实验	162
	参考文献	163
第 6 章	核爆地震信号的非线性判别分析	164
6.1	基于支持向量机的核爆地震模式识别	164
6.1.1	基于支持向量机的核爆地震自动识别	164
6.1.2	基于先验知识的核函数构造	169
6.1.3	信息几何在支持向量机中的应用	171
6.2	基于隐马尔可夫模型的核爆地震模式识别	176
6.2.1	隐马尔可夫模型	176
6.2.2	HMM 基本算法	177
6.2.3	HMM 的类型	181
6.2.4	矢量量化编码	181
6.2.5	HMM 在核爆地震模式识别中的应用	183
6.3	基于最近邻支持向量特征线融合的核爆地震模式识别	187
6.3.1	最近邻特征线分类算法及分析	188
6.3.2	最近邻支持向量特征线分类算法及应用	189
6.3.3	基于最近邻支持向量特征线融合的分类器设计及应用	191
6.4	基于核 K 相关的核爆地震模式识别	193
6.4.1	算法阐述	193
6.4.2	分类实验及结果分析	194

6.5	基于分类器集成的核爆地震模式识别	196
6.5.1	分类器组合方法的优点	196
6.5.2	分类器输出结果融合规则	197
6.5.3	基于样本重采样的分类器组合	199
6.5.4	基于模糊积分的分类器组合	201
6.6	核爆地震识别中的特征相空间研究	206
6.6.1	基本思路与方法原理	208
6.6.2	吸引子维数计算与结果分析	210
6.6.3	特征相空间等价性的数值实验及结果分析	211
6.6.4	讨论与应用	215
	参考文献	216
第7章	神经网络在核爆地震模式识别中的应用	220
7.1	神经网络基本原理	220
7.1.1	神经网络基本概念	220
7.1.2	BP 网络模型与 BP 算法	220
7.2	神经网络在核爆地震模式识别中的应用	222
7.2.1	标准 BP 算法的识别结果	223
7.2.2	BP 网络的改进学习算法	225
7.2.3	改进算法的选择及其识别结果	232
7.3	遗传算法在神经网络模式识别中的应用	234
7.3.1	遗传算法的基本原理	234
7.3.2	基于 GA 的多层前馈神经网络学习算法	235
7.3.3	MFANN 的泛化学习 GA 算法	238
7.3.4	泛化学习 GA 算法在核爆地震模式识别中的应用	241
	参考文献	243
第8章	协同神经网络与核爆地震模式识别	244
8.1	协同模式识别方法简述	244
8.1.1	常用的协同模式识别算法	246
8.1.2	协同模式识别算法中的关键技术	247
8.2	基于支持向量样本加权平均的原型模式选择算法	251
8.2.1	算法阐述	251
8.2.2	对算法的进一步改进	252
8.2.3	分类实验与结果分析	253
8.3	基于模糊 C -均值的原型模式选择算法	254

8.3.1	算法阐述	254
8.3.2	分类实验与结果分析	255
8.4	变步长的基于奖惩学习机制的注意参数训练算法	257
8.4.1	算法阐述	257
8.4.2	分类实验与结果分析	257
8.5	基于核函数的协同模式识别	259
8.5.1	基于核函数的协同模式识别算法	259
8.5.2	分类实验与结果分析	261
	参考文献	263
第9章	核爆地震模式识别的模糊综合评判	265
9.1	模糊集的基本知识	265
9.1.1	模糊特征和模糊分类	266
9.1.2	模糊关系与模糊变换	267
9.2	模糊综合评判模型	267
9.2.1	模糊综合评判的初始模型	267
9.2.2	多层次模糊综合评判	268
9.2.3	广义运算子模糊综合评判	270
9.3	核爆地震模式识别的模糊综合评判	270
9.3.1	方法思路	270
9.3.2	权向量构造	271
9.3.3	单因素评判矩阵	272
9.3.4	多层次模糊综合评判	274
9.3.5	模糊综合评判识别结果及分析	275
9.4	核爆地震模式识别系统框架:挑战与展望	277
9.4.1	核爆地震模式识别系统框架	277
9.4.2	挑战与展望	278
	参考文献	279
附录	名词术语中英文对照	280
后记		285

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Seismic monitoring of nuclear explosions	1
1.2 History and advances of seismic monitoring of nuclear explosions	3
1.2.1 Regional feature and propagation of seismic wave	6
1.2.2 Hypocenter feature of nuclear explosions	9
1.2.3 Classification technologies of nuclear explosions and earthquakes	11
1.2.4 Prospect of seismic monitoring of nuclear explosions	23
1.3 Traditional methods of seismic pattern recognition of nuclear explosions	24
1.4 Elements of seismic wave	32
1.4.1 Seismic wave	34
1.4.2 Seismic wave detonated by explosion	37
1.4.3 Kinematic characteristic of seismic wave	43
1.4.4 Dynamical characteristic of seismic wave	46
1.4.5 Monitoring methods and technologies of seismic wave	47
1.5 Datasheet of nuclear explosions and natural earthquakes	56
References	57
 Chapter 2 Fundamental of Pattern Recognition	 66
2.1 Basic concepts and methods	66
2.1.1 Statistical pattern recognition	66
2.1.2 Syntactic pattern recognition	69
2.1.3 Intelligent pattern recognition	70
2.2 Feature extraction and selection	71

2.2.1	Feature extraction	72
2.2.2	Feature selection	72
2.3	Classifier design	74
2.3.1	Linear discriminant function	75
2.3.2	Nonlinear discriminant function	76
2.3.3	Others	77
	References	78

Chapter 3 Signal Analysis and Preprocessing of Seismic Wave of Nuclear Explosion

80

3.1	Conventional analysis of nuclear explosion seismic wave	80
3.2	Fractal analysis and chaotic analysis of nuclear explosion seismic wave	85
3.2.1	Fractal analysis of nuclear explosion seismic wave	85
3.2.3	Chaotic time series phase space reconstruction based on resampling	87
3.2.3	Embedding dimension and time delay selection based on phase space correlation and PCA	93
3.3	Data preprocessing	98
3.3.1	Seismic event detection	98
3.3.2	Onset identification of seismic event	99
	References	106

Chapter 4 Feature Extraction and Selection of Seismic Waveform of Nuclear Explosion

110

4.1	Common methods of feature extraction and selection ...	110
4.1.1	Features in time domain	110
4.1.2	Features in frequency domain	115
4.1.3	Features in time-frequency domain	116
4.1.4	Feature selection methods	118
4.2	Feature extraction based on PCA and KPCA	119
4.3	Feature extraction based on principal component analysis with optimum classification performance	123

4.4	Feature extraction based on multi-resolution energy fractal analysis	127
4.5	Feature extraction based on KNMF	129
4.5.1	Basic theory of non-negative matrix factorization	129
4.5.2	Nuclear explosion feature extraction based on NMF	131
4.5.3	Kernel-based Non-negative Matrix Factorization(KNMF)	135
4.5.4	Feature extraction based on KNMF	136
4.6	Feature extraction based on time-frequency analysis	137
4.6.1	Spectral ratio and moment feature of time-frequency plane	138
4.6.2	Area feature in time-frequency plane	139
4.6.3	Singularity value feature based on time-frequency representation	140
4.7	Feature selection of nuclear explosion based on ordinal optimization	140
4.7.1	Outline of ordinal optimization	140
4.7.2	Feature selection of nuclear explosion based on ordinal optimization	142
4.8	Feature selection based on Gamma test	144
4.8.1	Basic concepts of Gamma test	144
4.8.2	Feature selection based on Gamma test	145
4.9	Feature selection based on ordinal optimization and Gamma test	146
	References	147

Chapter 5 Traditional Discriminant Analysis of Seismic Wave of Nuclear Explosion

5.1	Dichotomizer of one dimensional feature space	150
5.2	Seismic recognition of nuclear explosion based on nearest neighbor rule	150
5.2.1	Classifier design based on nearest neighbor rule	150
5.2.2	Classifier design based on k nearest neighbor rule	151
5.2.3	Classifier design based on fuzzy variational weighted k nearest neighbor rule	151
5.3	Classifier design based on least mean square	