

工作面瓦斯时序混沌分形 特性及预测

乔美英 著

 煤炭工业出版社

工作面瓦斯时序混沌分形 特性及预测

乔美英 著

煤炭工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

工作面瓦斯时序混沌分形特性及预测/乔美英著. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2015

ISBN 978 - 7 - 5020 - 4736 - 8

I. ①工… II. ①乔… III. ①煤层瓦斯—瓦斯含量—研究②煤层瓦斯—瓦斯涌出—研究 IV. ①TD712

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 295581 号

工作面瓦斯时序混沌分形特性及预测

著 者 乔美英
责任编辑 徐 武
编 辑 杜 秋
责任校对 尤 爽
封面设计 尚乃茹

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
电 话 010 - 84657898 (总编室)
010 - 64018321 (发行部) 010 - 84657880 (读者服务部)

电子信箱 cciph612@126.com
网 址 www.cciph.com.cn
印 刷 北京市郑庄宏伟印刷厂
经 销 全国新华书店

开 本 850mm × 1168mm¹/₃₂ 印张 5 字数 127 千字
版 次 2015 年 11 月第 1 版 2015 年 11 月第 1 次印刷
社内编号 7591 定价 22.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换,电话:010 - 84657880

内 容 简 介

本书阐述了工作面瓦斯预测煤与瓦斯突出理论，以此为基础分析了工作面瓦斯涌出量时序混沌特性，建立了最小二乘向量机的混沌时间序列预测模型，利用已建立的模型对突出的掘进工作面瓦斯涌出量时间序列数据进行预测。

本书可供煤矿自动化专业技术人员、研究人员及安全工程专业技术人员使用，也可作为大专院校相关专业的教师、研究生的参考用书。



前 言

在煤矿井下生产中,工作面瓦斯涌出量占全矿井涌出量的50%~80%,是矿井主要的瓦斯涌出源。其中,煤巷掘进工作面是首先揭露煤层,瓦斯涌出量比较大,而且在掘进巷道中极易发生瓦斯积聚,是煤与瓦斯突出事故的主要因素之一。因此,掌握掘进工作面的瓦斯压力分布和涌出规律,预测掘进工作面瓦斯涌出量的动态趋势,对预防矿井煤与瓦斯突出具有重要的意义。

目前,煤矿工作面大都安装了监测监控系统,大量含有瓦斯的动力学信息的工作面瓦斯涌出量时间序列数据被实时获得,通过利用掘进工作面瓦斯浓度变化,结合计算机技术,能够实现瓦斯突出短期预报。采用该技术虽然不能抑制煤与瓦斯突出的发生,但可以为瓦斯抑爆、隔燃系统联动、抑制瓦斯爆炸的产生、阻止爆炸火焰的传播提供重要的信息,降低煤与瓦斯突出事故造成的损失。

由于工作面瓦斯涌出是一个复杂的非线性动力学系统,而现有的煤与瓦斯突出预测预报技术仅针对瓦斯浓度瞬时增幅预警、瓦斯浓度平均值增幅预警等简单的数据分析功能,没有更进一步地研究其非线性特性,因此,预测预报效果有限。本书从工作面瓦斯涌出时间序列的非线性特性出发,利用混沌分形理论对时间序列、瓦斯涌出量数据的混沌分形特征量进行深入的分析,通过建立小样本统计学习理论基础上的LS-SVM模型对一个工作面的几个案例进行深入的研究,并对LS-SVM参数的选择进行了优化分析,最终建立了鲁棒加权Bayesian LS-SVM模型。书中

对几种模型的预测结果分别进行了分析比较,从理论上验证了该模型的可行性。

在本书的撰写过程中,中国矿业大学马小平教授提出了许多宝贵的意见和建议,河南理工大学安全学院的刘彦伟、彭红星、陈向军副教授和中国矿业大学信电学院常俊林、叶宾、缪燕子副教授提供了大量的资料,河南理工大学陶慧副教授和中国矿业大学研究生褚晓光、张守田同学参与了书稿的校对工作,在此表示感谢!同时,感谢我的家人,是他们的帮助和支持促使我完成了书稿的撰写。

由于作者水平有限,书中不妥之处,敬请批评指正。

著 者

2015年9月

目 次

1 绪论	1
1.1 煤与瓦斯突出预测研究现状	2
1.2 混沌时间序列及其研究现状	7
1.3 混沌时间序列预测瓦斯的研究现状	10
1.4 工作面瓦斯时序混沌分形特性及预测的研究 主要内容及意义	10
2 工作面瓦斯涌出量预测煤与瓦斯突出理论基础	13
2.1 工作面瓦斯动态涌出量影响因素分析	13
2.2 工作面瓦斯涌出量预测瓦斯突出理论基础	17
2.3 研究实例	21
2.4 本章小结	30
3 工作面瓦斯涌出量时序混沌特性分析	31
3.1 相空间重构理论参数选取	33
3.2 定性的时间序列数据混沌特性识别	38
3.3 混沌时间序列的最大 Lyapunov 指数	44
3.4 本章小结	53
4 基于改进 G-P 算法的关联维数求取	55
4.1 算法理论	57
4.2 基于 FCM 的典型混沌动力学系统的 关联维数研究	62

4.3	掘进工作面瓦斯涌出量时间序列数据的 关联维数	71
4.4	本章小结	76
5	基于改进 R/S 分析的工作面瓦斯涌出量时间序列分形 特性研究	78
5.1	R/S 分析法的基本原理	80
5.2	R/S 分析法对比研究	85
5.3	掘进工作面瓦斯涌出量时间序列长程趋势分析	92
5.4	本章小结	97
6	基于 Bayesian 推理的 LS-SVM 工作面瓦斯涌出量 动态趋势短期预测	98
6.1	LS-SVM 回归模型基本原理	100
6.2	基于 Bayesian 推理的 LS-SVM 回归模型	103
6.3	基于 Bayesian 推理的 LS-SVM 瓦斯涌出量 时间序列预测研究	108
6.4	本章小结	121
7	基于 BWLS-SVM 工作面瓦斯涌出量动态趋势 短期预测	123
7.1	加权 LS-SVM 的基本原理	123
7.2	基于 BWLS-SVM 的工作面瓦斯涌出量时间 序列预测研究	124
7.3	本章小结	135
	参考文献	136

1 绪 论

煤与瓦斯突出是在采掘过程中发生的一种相当复杂的动力学现象，是导致煤矿灾害发生的主要因素之一。煤与瓦斯突出事故灾害严重制约着煤炭生产的发展，甚至整个国民经济和社会的可持续发展，是我国矿业发展中亟待解决的重大难题。煤与瓦斯突出发生的原因复杂，影响因素众多，突发性和破坏性极强，因而受到世界各产煤国家的重视。

我国的煤与瓦斯突出较为严重，2000 年 1 月至 2008 年 12 月，全国国有煤矿共发生煤与瓦斯突出伤亡事故 199 起，共造成 1063 人死亡，其中，一次死亡 10 人以上的突出事故 29 起，死亡 427 人。2009 年发生死亡 10 人以上的重特大瓦斯事故 6 起，死亡 253 人；2010 年发生死亡 10 人以上的重特大瓦斯事故 11 起，死亡 220 人，其中煤与瓦斯突出事故 6 起，死亡 150 人，分别占重特大事故的 54.5% 和 68.2%。2011 年全国发生较大以上煤与瓦斯突出事故 17 起，死亡 103 人。因此，我国对防治煤与瓦斯突出尤为重视，并在长期的煤炭安全生产实践中形成了两个“四位一体”综合防治体系：一是区域综合防突措施，即区域突出危险性预测、防治突出措施、防突措施效果检验及安全防护措施；二是局部综合防突措施，即工作面突出危险性预测、工作面防突措施、工作面防突措施效果检验、安全防护措施。虽然，我国在煤与瓦斯突出防治上采取了许多技术和管理措施，然而，煤与瓦斯突出事故依然时有发生，尤其是在煤巷掘进时期发生的煤与瓦斯突出次数占矿井总突出次数的首位，因此对煤巷掘进工作面的煤与瓦斯突出进行深入研究，意义重大。

1.1 煤与瓦斯突出预测研究现状

1.1.1 国外煤与瓦斯突出预测研究现状

煤与瓦斯突出是煤矿井下生产中破坏较为严重的自然灾害之一，它严重威胁着煤矿的安全生产。由于煤与瓦斯突出能在一瞬间向采掘工作面空间喷出巨量的煤与瓦斯流，不仅严重地摧毁巷道设施，毁坏通风系统，而且使附近区域的井巷全部充满瓦斯与煤粉，造成瓦斯窒息以致煤流埋人，甚至还会造成煤尘和瓦斯的爆炸等严重后果。因此，世界各国对煤与瓦斯突出预测都非常重视，投入了大量的财力、物力、人力进行科技攻关，并取得许多可供借鉴与参考的研究成果。表 1-1 为国外煤与瓦斯突出预测技术研究现状。

表 1-1 国外煤与瓦斯突出预测技术研究现状

突出预测依据		应用及特点
煤 的 性 质	依据煤的破坏类型	苏联科学院地质所对煤的原生和次生节理性质的变化、微裂隙间距、断口、光泽等特性把煤分成五种破坏类型，在煤层中含有第Ⅳ、Ⅴ破坏类型的分层被认为是发生突出的必要条件
	依据煤的强度性质	苏联斯科琴斯基矿业研究所对不同破坏类型煤的强度测定，发现突出危险的Ⅳ、Ⅴ类煤的强度较Ⅰ、Ⅱ类低数倍。在捷克斯洛伐克的三个矿井用落锤法、针入度法和滚筒破碎法进行过测定
	依据煤的突出危险性综合指标 K_1 和 K_2	苏联东方研究所综合考虑煤层瓦斯放散初速度 ΔP 和硬度系数 f 计算综合指标 $K_1 = \Delta P - 10f^2$ ， $K_2 = \Delta P - 25f^2$ ；先确定 K_1 ，当 $K_1 \leq 1$ 时，则无突出危险；当 $K_1 > 1$ 时，计算 K_2 ， $K_2 < 1$ 时，属突出威胁区； $K_2 > 1$ 时，为突出危险区
	依据煤的突出危险综合指标 a	苏联东方研究所对突出和非突出煤的电阻率 γ 和煤的吸附瓦斯变形量 δ 进行研究，表明两参数皆与 ΔP 相关。 $\gamma = a\delta$ ，当 $a > 100$ 无突出危险； $a < 100$ 时，有突出危险

表 1-1 (续)

突出预测依据		应用 及 特 点
煤 的 性 质	依据煤的挥发分含量和电阻率	维·恩·尼阔林统计分析了 1650 个煤层, 1250 次突出, 提出当烟煤挥发分大于 35% 时, 无烟煤的电阻率的对数小于 3.3 时, 突出的概率小。顿巴斯有 23 对深井(深 500 ~ 800 m) 符合上述两项指标, 均未发生突出
	依据煤的微观结构特征	日本学者认为突出煤层中有“分枝性危裂”。保加利亚学者认为突出煤层裂隙多, 非突出煤层裂隙少
	依据煤的水分	煤层的水文地质条件在很大程度上也决定煤层突出危险性, 对于顿巴斯煤田, 当煤中水分(天然及人工润湿) 大于 4% ~ 6% 时, 就没有突出危险性
瓦 斯 因 素	依据煤的瓦斯含量	突出煤层中煤的瓦斯含量大于 $10 \text{ m}^3/\text{t}$; 法国塞维内煤田当煤的瓦斯含量小于或等于 $9 \text{ m}^3/\text{t}$ 时, 煤层不易突出
	依据按钻孔瓦斯涌出特征	苏联东方研究所根据钻孔瓦斯涌出速度随时间变化, 提出划分突出煤层与非突出煤层的指标 $\Delta q: \Delta q = q_m - q_k$; 式中, q_m 为打钻结束后立即测定的每 1 m 钻孔的瓦斯涌出量, m^3/min ; q_k 为钻完 24 h 后, 每 1 m 钻孔的瓦斯涌出量, m^3/min
	依据瓦斯成分	苏联学者曾以煤层瓦斯成分缺氮作为无突出危险的指标; 日本学者认为煤层瓦斯成分中重碳氢化合物含量增高是突出危险性指标
地 压 因 素	依据煤层围岩应力状态	马凯耶夫煤矿安全科研所用水力破裂法测定了突出危险煤层应力状态
	依据煤层顶底板靠拢速度	苏联、保加利亚、日本等国家的学者都认为, 突出前顶底板靠拢速度减缓乃至停滞, 常以工作面采煤时和无作业时顶底板靠拢速度的比值 K 来表示突出危险性。规定 $K > 30$ 时有突出危险性, $K = 3 \sim 6$ 时无突出危险性

表 1-1 (续)

突出预测依据		应用及特点
地 压 因 素	依据钻孔 钻屑量	苏联、法国、德国、日本等都提出过用这一方法来预测突出。该法的要点是记录每打 1 m 钻孔的排粉量, 以钻孔的理论容积为基准计算倍率, 倍率越大越易突出。各国采用的指标不完全相同, 法国、德国认为倍率为 8 时有突出危险, 日本用每米钻孔排粉量大于 6 L/m 作为突出危险指标
	依据煤层 震动音响	苏联自 1952 年起开始了这方面的研究工作, 研制了接收音响信号的地音仪器, 并在现场进行了长期试验。多年的现场试验表明, 突出前噪声水平升高, 但并非每一次升高皆导致突出的发生

1.1.2 国内煤与瓦斯突出预测研究现状

我国煤与瓦斯突出预测起始于 20 世纪 50 年代, 主要从宏观定性上研究某些区域地质因素与煤层瓦斯涌出量的关系, 最终提出预测结果。之后定量方法也被尝试着用来解决预测煤层瓦斯涌出量。首先是 1953 年在辽源矿务局中央竖井利用矿山统计法计算煤层瓦斯含量梯度, 随后在 1959 年进一步开展了煤层瓦斯含量及其影响因素的理论研究, 探索煤中水分、孔隙率、煤体温度等因素对瓦斯含量的影响。而定量分析法的理论研究开始于 1959 年, 淮南矿务局谢家集二矿利用矿山统计法预测矿井深部瓦斯涌出量。1959—1964 年利用该方法先后完成了抚顺煤田、北票台吉矿、南桐、梅田等矿区矿井深部瓦斯涌出量预测工作。1978 年抚顺煤科分院首次从美国引进了直接测定钻孔煤层瓦斯含量方法, 并在此基础上做了一定的改进, 从而使我国勘探阶段的瓦斯预测又向前迈进了一步。20 世纪 70 年代焦作工学院的杨力生教授在中国开创性地建立了瓦斯地质学科, 从而为瓦斯涌出量预测方法的研究注入了新思想。从 20 世纪 80 年代起我国矿井瓦斯涌出量的预测研究进入定量化、微观化阶段。1986 年, 苏

联的煤层瓦斯含量计算公式被煤炭科学研究总院抚顺分院的于良臣教授引入到我国，并在淮南矿务局潘三矿的矿井瓦斯涌出量预测中加以应用。之后抚顺煤科分院与阳泉矿务局合作，在苏联预测方法的基础上，结合我国煤矿的一些实际情况对该方法的一些参数加以修改，最终提出了分源预测法。

目前我国已形成了突出预测、防突技术措施、措施效果检验到安全防护措施的“四位一体”综合防突技术体系和相应的技术手段，并将其贯穿在地质勘探、生产矿井新水平、新井建设、新采区的开拓延深、工作面的突出治理及整个矿井的开采过程中，并取得了较好的效果，但是这些防突技术措施都用到接触式钻孔法，需要在工作面前方打钻测定突出预测指标。这些防突技术措施，无论是超前钻孔，还是松动爆破，措施工程量很大，而应用最为广泛的超前钻孔措施，执行一次至少要两到三天，个别突出矿井甚至需要一周左右的时间，这必然严重制约掘进速度。

因此，近年来研究动态的非接触式工作面的煤与瓦斯突出预测方法成为热点，表 1-2 为国内工作面连续非接触式煤与瓦斯突出预测现状。

非接触式预测除了上面讲到的预测方法外，随着数学方法、计算机技术及控制理论的发展，还形成了融合多种控制理论及数学方法的非接触预测方法，如将一些先进的理论方法：计算机模拟、模糊数学理论、灰色系统理论、专家系统、分形理论与非线性理论、流变与突变理论等应用于煤与瓦斯突出的定量评价与分析中。主要的成果有张剑英等（2007）提出 ANFIS 的煤矿瓦斯浓度预测方法研究，桂祥友等（2006，2007）和郭德勇等（2007）提出灰色系统理论与模糊聚类的煤与瓦斯突出预测研究，谭云亮等（2007）提出小波基神经网络的煤与瓦斯突出预测方法研究，张子戌等（2007）提出了模糊聚类与模糊模式识别的突出预测，王其军等（2008）提出基于免疫神经网络模型的瓦斯浓度智能预测等。

表 1-2 工作面连续非接触式煤与瓦斯突出预测现状

非接触式方法		理 论 依 据	研 究 现 状	存在问题
根据瓦斯	利用瓦斯涌出动态指标 V30	爆破后 30 min 内的巷道瓦斯涌出量与爆破落煤量的比值,单位 m^3/t 。V30 值达到煤层可解吸瓦斯含量的 40%,就有突出危险	此法应用于芙蓉矿务局白皎煤矿 20112 顺槽掘进工作面,苏文叔(1996)利用 V30 对工作面的突出危险性进行了预测	瓦斯动态涌出判识突出的技术有待提高
根据煤体能量辐射	声发射(AE)技术预测	由于岩压、瓦斯动力作用,煤、岩产生变形和破坏,并以弹性波的形式向四周传播,使介质产生振荡,产生声响效应。声发射预测原理就是接收煤(岩)破坏时产生的声响信号,并进行处理,选择临界值,借以评价突出危险性	我国最早由抚顺分院研制了声发射仪,并应用于焦作九里山煤矿 13 采区 13071、13081 上分层工作面。随后聂百胜(2002)、邹银辉(2005)及曹树刚(2007)等对声发射技术进行了相应的研究	煤岩失稳破坏过程的声发射信号特性提取较难实现
	红外辐射预测	煤与瓦斯突出的准备、发动和发生阶段会产生明显的红外辐射热效应,是突出演变过程中理化综合效应的外部反映	赵庆珍(2009)利用红外探测技术对阳煤集团一矿、新景矿 3 号突出煤层煤壁进行煤与瓦斯突出预测	红外信号受环境温度影响较大
	工作面煤层电磁辐射变化	根据含瓦斯煤层在变形破坏过程中具有不同程度的电磁辐射强度来预测瓦斯	王恩元等(2000)在平顶山八矿的突出工作面和 13190 机巷进行试验研究。撒占友等(2006)在实验室对煤岩电磁辐射效应进行了研究	工作面现场电磁辐射的干扰源较多

表 1-2 (续)

非接触式方法		理 论 依 据	研 究 现 状	存 在 问 题
地 球 物 理 方 法	利用电吸附效应,测定地电场、电势和电流强度变化预测	地电场可表征采动应力集中程度、瓦斯运移动能和煤体破坏极限应力带宽度、煤孔隙率和煤强度等。地电场电势的降落也是发生瓦斯突出的前兆信息,根据地电场电势的变化规律可进行瓦斯突出预测	王宏图等(2004)在实验室研究了地电场作用下煤中甲烷气体渗流性质	迄今为止未见该方法预测瓦斯突出技术用于实践案例

近年来,随着非接触式瓦斯预测方法研究的深入,对工作面前方的瓦斯涌出量时间序列数据的分析成为热点。高莉等(2008)提出基于 W-RBF 的瓦斯时间序列预测方法研究。王凯等(2000, 2005, 2007)提出了钻孔煤与瓦斯突出的非线性特征及预测模型。陈祖云(2009)提出将混沌-分形理论用于工作面煤与瓦斯突出的研究中。邓明等(2010)利用时间序列的 K 线图预测工作面瓦斯涌出量。煤矿工作面的瓦斯含量直接工作面瓦斯涌出量有关,而瓦斯涌出量又直接体现的是瓦斯在煤层中的动力学特性,所以根据 Taken 嵌入定理,利用瓦斯涌出量的时间序列数据重构工作面瓦斯时间序列的动力学空间模型,利用此模型对网络进行训练建模可以实现对工作面瓦斯涌出量的短期预测。本书是从瓦斯涌出量的时间序列复杂特性——分形与混沌特性出发寻求新的煤与瓦斯突出预测的非接触式预警方法。

1.2 混沌时间序列及其研究现状

混沌运动具有普适性,因此对混沌动力学理论的深入研究不仅可以推动其他学科的发展,而且其他学科的深入研究与发展也会反过来加深人们对混沌动力学的理解,所以混沌理论与各门学

科之间是相互渗透、相互促进的。混沌理论在许多领域均得到了普遍的应用,如生物学、数学、物理学、电子学、信息学、气象学、经济学等领域。人们通常所说的混沌理论研究就是指非线性动力学混沌的研究,其研究目的是揭露貌似随机现象背后隐藏的普遍规律,最终寻求一大类复杂问题背后的普遍遵循的共同规律。近年来,混沌科学虽然在基础理论方面取得了很大的进展,但对混沌科学的研究与应用仍处于数值方法分析阶段,将其运用到实际的工程应用分析中,存在着准确的复杂特性与预测特性之间定量关系难以确定的问题。

时间序列是存在于自然科学或社会科学中的某一变量或指标的数值或观测值,按照其出现时间的先后次序,以相同的或不同的时间间隔排列的一组数值。时间序列中不仅包含了允许误差范围内系统变量所有过去的信息,而且也包含了参与系统演化的所有变量的大量信息。而时间序列预测就是利用被预测事物过去和现在的观测值,构造一个依时间变化的预测模型,并借助一定的法则来推测未来。

建立传统的混沌时间序列预测模型方法通常分为两种:一种是基于非线性数学模型的动力学方法,另一种是基于实际观测数据的相空间重构方法。动力学方法是比较容易掌握的方法,它是建立在人们熟知的物理定律上,如连续动力学方程、能量守恒定律等,其基本手段是通过对这些物理模型简化和数值求解,来达到预测目的;而重构相空间的方法是假设获得了待测物理系统完整的观测数据,而且可通过拟合这些数据建立时间序列精确固定不变的预测模型,在预测过程中不能再修改预测模型的参数。但是对于现实中的复杂巨系统而言,建立其动力学模型是不大可能的,所以在实际的混沌时间序列的预测中,如脑电信号识别、心率异常信号识别、故障信号的识别、瓦斯涌出量的预测等,常常是建立在 Packard 的重构相空间理论基础之上。

在具体的实际分析中,时间序列数据往往表现为多层次结

构、多变量动态的演化行为,所以很难用某种确切函数关系来表达其非线性预测模型。由于任意非线性函数都可以用神经网络来逼近,所以神经网络成了非线性时间序列预测建模的有效工具之一。如采用多层感知机 (Multi - Layer Perceptrons, MLP) 网络和径向基函数 (Radial Basis Function, RBF) 网络来建立时间序列模型,将混沌理论与神经网络相结合,利用混沌时间序列的重构相空间,在此空间中利用神经网络逼近相点的演化规律。在煤与瓦斯预测方面:王凯等 (2005, 2007) 提出将 BP 神经网络分类器用于瓦斯涌出量的预测研究中。郭德勇等 (2007) 提出基于灰色系统理论与神经网络的煤与瓦斯突出预测。李洋等 (2009) 提出基于贝叶斯正则化 BP 人工神经网络的煤与瓦斯突出预测。

20 世纪 90 年代,支持向量机 (Support Vector Machines, SVM) 以及一些核方法逐步被用于模式分类和回归问题。由于 SVM 具有前馈神经网络不可比拟的优点,因此在众多问题上具有取代前馈神经网络的趋势。与此同时,支持向量和核方法也被用于混沌时间序列的预测中,并获得较好的结果。最小二乘支持向量机 (Least - Square Support Vector Machine, LS - SVM) 是在 SVM 的基础上发展起来的,具有 SVM 的大部分优点,且可用于回归分析研究,近年来,许多学者将 LS - SVM 用于混沌时间序列预测的研究。但是 LS - SVM 存在参数的选择问题及鲁棒性丧失问题,针对这两个缺点,近年来也有许多算法与 LS - SVM 相结合形成新的 LS - SVM,如 PSO - LS - SVM 算法、GA - LS - SVM 算法、加权 LS - SVM 局域预测法、贝叶斯框架下的 LS - SVM 等。由于 LS - SVM 的泛化性能较好,而且优化过程是一个凸优化过程,所以许多学者将 LS - SVM 用于煤矿灾害的预警研究中,如 Cao Shugang 等 (2008) 提出 LS - SVM 的工作面瓦斯预警,郭晓荟等 (2007, 2009, 2010) 提出了在线 LS - SVM 瓦斯预警、瓦斯涌水量的时间序列预测研究及洗煤厂日用水量的预