

井筒变形监测 理论与方法

王坚 高井祥 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

井筒变形监测 理论与方法

王坚 高井祥 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

井筒变形监测理论与方法/王坚,高井祥编著. —武汉:武汉大学出版社,2018.4

ISBN 978-7-307-20093-7

I. 井… II. ①王… ②高… III. 井筒变形—安全监测
IV. TD321

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 057838 号

责任编辑:鲍 玲 责任校对:李孟潇 版式设计:马 佳

出版发行: **武汉大学出版社** (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:720×1000 1/16 印张:16.75 字数:249千字 插页:1

版次:2018年4月第1版 2018年4月第1次印刷

ISBN 978-7-307-20093-7 定价:40.00元

版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

井筒是一个矿井的“咽喉”部分,作为煤炭生产的主要通道,其正常运行是保证矿井安全生产的重要环节之一。井筒在其运营期间,将不可避免地受到多相采动及其他工程因素的综合影响,从而导致物理性质及力学方面的变化,引起井筒持续变形,甚至诱发井壁破坏。井筒变形超过一定限差后,将对提升系统产生威胁,影响煤矿安全生产。

随着科学技术的发展,井筒变形监测的手段不断进步,从传统人工测量到集成传感器再到卫星定位测量等多元化监测技术。但受到传感器本身精度的影响,加之矿井环境异常复杂,高精度可靠的井筒变形监测方法仍然值得深入研究。国内外研究井筒变形监测与数据处理的著作少之又少。本书是作者根据自己近 20 年的井筒变形研究(科研与实践)成果提炼而成的。本书系统阐述了采用水准测量、卫星定位测量进行井筒变形监测的过程;介绍了井筒倾斜变形监测、中线变形监测的方法;提出了井筒垂直变形特征与灰色预测模型;针对井筒动态变形监测数据,提出了卫星监测变形提取模型,并介绍了基于卫星与加速度计的井筒自振频率分析技术;提出了井筒变形预警与完备性监测模型;最后,研发出井筒变形模拟系统,用于变形数据的模拟与分析。

本书得以付梓,要感谢以下同学们兢兢业业致力于井筒变形监测与数据处理方面的研究工作:韩厚增、宁一鹏、王川阳、李浩博、李磊、余航、王世达、李增科、彭祥国、姚丽慧、秦长彪、唐艳梅、钱荣荣、杨海潮等,没有他们的参与就没有本书的出版。另外,还要感谢余学祥教授、张书毕教授、郑南山教授、张安兵教授、许长辉、刘超、谭兴龙等老师们的付出与所做的工作,在此表示衷心的感谢!

本书有关科研工作的完成得益于国家自然科学基金(编号:40774010)、中澳科技合作特别基金(编号:50810076)、高等学校博士学科点专项科研基金(20040290503)、江苏省自然科学基金(BK2009099)及部分煤炭企业的科研项目资助,谨在此一并致谢。

由于作者水平和知识面有限,本书中仍可能有不妥与疏漏,恳请读者予以批评指正。

作者

2017年5月8日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 国内外研究现状	2
1.1.1 井筒变形监测方法	2
1.1.2 井筒变形监测分析	5
1.1.3 井筒变形监测预报预警	7
1.2 研究趋势	8
1.3 研究内容	9
第 2 章 井筒沉降精密水准监测技术	11
2.1 井筒沉降监测设计	11
2.1.1 作业依据	11
2.1.2 高程系统	11
2.1.3 点位设计	12
2.1.4 水准测量原理	13
2.1.5 变形监测网	14
2.1.6 技术设计书	17
2.2 井筒沉降监测实施	17
2.2.1 仪器设备	17
2.2.2 监测周期	18
2.2.3 测站施测要求	19
2.2.4 注意事项	21
2.3 数据处理与资料提交	21
2.3.1 数据处理	21

2.3.2 变形分析	22
2.3.3 资料提交	22
2.4 井筒水准沉降监测实例	22
2.4.1 监测基准网布设	23
2.4.2 主井监测网布设	23
2.4.3 数据处理与分析	25
2.5 本章小结	29
第3章 井筒变形卫星控制网监测技术	30
3.1 GNSS 控制网变形监测基准	30
3.1.1 GNSS 控制网监测基准	30
3.1.2 GNSS 变形监测网平差基准	31
3.2 GNSS 变形监测网设计	32
3.2.1 作业依据	32
3.2.2 监测网分级划分	32
3.2.3 布网原则	33
3.2.4 选点与埋石	34
3.2.5 仪器选择	38
3.3 GNSS 网外业施测	40
3.3.1 基本技术要求	40
3.3.2 观测作业	40
3.4 GNSS 监测网变形分析	42
3.4.1 两期变形稳定检验模型	42
3.4.2 多期监测卡尔曼滤波模型	42
3.4.3 GNSS 监测网形变分析	46
3.5 实例应用	47
3.5.1 GNSS 外业观测	48
3.5.2 数据处理	49
3.5.3 井筒变形分析结果	50
3.6 本章小结	52

第 4 章 井塔倾斜变形监测技术	57
4.1 水平角法井塔倾斜监测技术	57
4.1.1 外业实施方案	58
4.1.2 监测精度分析	59
4.2 水准沉降法井塔倾斜监测技术	61
4.2.1 井塔任意点沉降量计算模型	61
4.2.2 井塔水平位移公式推导	62
4.3 井塔倾斜监测案例	65
4.3.1 水平角法倾斜监测案例	65
4.3.2 水准沉降法井塔倾斜监测案例	66
4.4 本章小结	68
第 5 章 井筒中线变形监测技术	69
5.1 基本原理	69
5.1.1 四基准垂线法	69
5.1.2 钢丝线坐标测量	70
5.2 野外施测	72
5.2.1 测量基准	72
5.2.2 测量步骤	74
5.3 井筒井壁中线拟合	77
5.3.1 测点坐标计算	77
5.3.2 井壁中线建模	77
5.4 变形拟合模型	79
5.4.1 经典最小二乘原理	79
5.4.2 抗差整体最小二乘	80
5.4.3 模拟数据验证	83
5.5 实例应用	85
5.5.1 定向钢丝坐标观测	86
5.5.2 极坐标法	87
5.5.3 前方交会法	88
5.5.4 两种方案对比	89

5.6 井壁特征点坐标序列	89
5.6.1 特征点数据分析	89
5.6.2 井筒中心线变形	95
5.6.3 井筒三维变形结果	102
5.7 本章小结	104
第 6 章 井筒变形序列特征分析技术	106
6.1 变形数据变异特性分析	106
6.1.1 区域化变量	106
6.1.2 变异函数及其描述	107
6.1.3 实验分析	108
6.2 变形数据非线性特征分析	110
6.2.1 主分量分析	111
6.2.2 关联维计算	112
6.2.3 Lyapunov 指数	115
6.2.4 实验分析	115
6.3 变形的小波多尺度特征分析	117
6.3.1 基本理论	117
6.3.2 多尺度特征分析	120
6.3.3 实验分析	121
6.4 本章小结	127
第 7 章 井筒变形多路径分离技术	128
7.1 动态变形监测模型	128
7.2 多路径效应原理	131
7.3 井筒动态变形多路径分离技术	133
7.3.1 经验模态分解	133
7.3.2 小波变换	135
7.3.3 Vondrak 滤波	136
7.3.4 技术路线	137
7.4 评价指标	138

7.5 野外实验数据分析	139
7.5.1 多路径信息提取	144
7.5.2 动态变形序列提取	152
7.6 某矿井筒实测数据分析	154
7.6.1 多路径信息提取	156
7.6.2 动态变形序列提取	163
7.7 本章小结	165
第 8 章 井筒变形 GNSS/INS 融合监测技术	166
8.1 井筒 GNSS/INS 集成监测系统	166
8.1.1 GNSS/INS 组合变形监测系统	166
8.1.2 惯性元件的误差辨识	168
8.1.3 惯性系统的自对准	173
8.2 加速度计动态变形监测方法	177
8.3 GNSS/INS 集成动态变形监测方法	178
8.3.1 惯性导航系统力学编排	179
8.3.2 组合定位系统误差模型	181
8.4 兖州某矿主井监测实验	184
8.4.1 动态变形监测实验环境	184
8.4.2 GPS/BDS 集成变形监测数据分析	184
8.4.3 加速度计动态变形监测数据分析	187
8.4.4 GPS/BDS/INS 集成变形监测数据分析	189
8.5 本章小结	190
第 9 章 井筒变形预报模型研究	191
9.1 基于灰色理论的井筒变形预报	191
9.1.1 预报模型	192
9.1.2 预报精度检验模型	194
9.1.3 试验结果及分析	195
9.2 基于 GA-BP 的井筒变形预报	199
9.2.1 BP 神经网络	199

9.2.2 遗传算法	200
9.2.3 GA-BP 网络结构	201
9.2.4 预报模型评价指标	202
9.2.5 试验结果及分析	203
9.3 基于相空间重构的 LS-SVM 井筒变形预报	207
9.3.1 最小二乘支持向量机算法	207
9.3.2 混沌时间序列的重构相空间	209
9.3.3 基于混沌相空间重构的最小二乘支持向量机模型	209
9.3.4 试验结果及分析	210
9.4 本章小结	214
第 10 章 井筒变形预警及完备性监测模型	215
10.1 累积和算法简介	215
10.1.1 单边 CUSUM 算法	215
10.1.2 双边 CUSUM 算法	216
10.2 基于累积和检验的预警模型	217
10.2.1 累积和预警模型	217
10.2.2 预警参数选取方法	219
10.3 预警完备性监测体系	220
10.4 野外模拟数据验证	221
10.5 井筒实测数据验证	225
10.6 本章小结	229
第 11 章 井筒变形模拟系统研究	230
11.1 井筒变形模拟系统设计	230
11.1.1 系统组成	230
11.1.2 系统功能设计	233
11.2 系统控制电路	234
11.2.1 电机驱动机制	234
11.2.2 控制信号流程	235
11.2.3 系统电路方案	235

11.3 上位机软件系统	236
11.3.1 数据文件	238
11.3.2 轨迹运动	238
11.3.3 点进运动	238
11.4 下位机设计	239
11.4.1 单片机最小系统	239
11.4.2 串口通信模块	240
11.4.3 控制信号驱动电路	240
11.4.4 安全检测电路	242
11.4.5 软件设计	242
11.5 变形模拟实验	243
11.5.1 GNSS 基本性能测试	243
11.5.2 GPS/加速度计变形监测实验	248
11.6 本章小结	250
参考文献	251

第1章 绪 论

随着矿区开采深度加大,冲击地压威胁日益严重,进行矿区变形的预测预报就变得愈加重要。目前,矿井安全事故频发,我国每年因矿难造成的死亡人数达上千人,直接经济损失达几十亿元。矿区常见的典型灾害事故有:瓦斯爆炸事故、矿井透水事故、冒顶事故、井壁破裂事故,等等。

其中,井筒是一个矿井的“咽喉”部分,作为煤炭生产的主要通道,其正常运行是保证矿井安全生产的重要环节之一。因为在运营期间,井筒将会不可避免地受到多相采动以及其他工程因素的影响,从而导致物理性质力学方面的变化,进而诱发井壁破坏。此外,地应力变化或者地震等同样会导致井筒破坏。如果井筒出现变形,必然导致严重的安全隐患。井筒形变破裂导致的危害有涌水、涌沙、掉块、罐道扭曲变形等,每年抢险加固造成的经济损失数亿元。一般可采用缩小井筒净直径的办法来减少井壁破裂危害,但那样会直接限制井筒的提升作业能力。

2010年8月5日,智利北部圣何塞铜金矿井壁破裂,发生严重塌方事故,导致33名矿工被困700米深的地下。历经长达69天的漫长营救,被困矿工终于获救。2014年,莫桑比克北部一处非法矿井由于安全措施不完善,缺乏监测,不幸发生坍塌事故,数十名矿工被困井下。2015年12月25日,临沂市平邑县一石膏矿因临近的废弃石膏矿采空区坍塌引发事故,4号提升井井壁破裂坍塌,14名工作人员被困井筒中。

变形是判断井筒是否安全的重要指标,也是进行井筒维修的依据。由于引起井筒变形破坏的机理复杂,再加上井下工作环境恶劣,监测点众多且分散,很难在矿井变形方面实现全面、精确的监测。因

此,研究矿山井筒变形的监测方法、变形数据处理分析模型,对井筒变形进行合理监测,精确确定井筒变形的幅度方向及位置信息,进行井筒变形预报预警是制定综合治理井筒方案的重要前提,也是矿山安全保障的重要研究内容。

1.1 国内外研究现状

1.1.1 井筒变形监测方法

主副井筒担负着矿井的通风、提升任务,关系着矿井的生产安全命脉,因此很有必要进行井筒变形监测,获得监测数据,为进行合理的支护初始设计提供可靠的依据。立井井筒变形监测由于受观测条件差、时间周期长的影响,为了能在提高监测精度的同时,降低投资成本,有必要对立井井筒筒壁变形监测方法进行讨论,求得合理的监测方案。

目前采用的立井井筒变形检测方法大致分两种:一种是基于变形检测理论的几何测量法,另一种是传感器法,它是基于岩石力学的参数检测方法。

基于变形检测理论的几何测量法有基于精密水准变形监测技术、基于钢丝定向的监测方法(倒锤法)、基于激光垂准仪的监测方法、基于GPS技术的监测方法等。而传感器法是在井筒内壁上安装传感器,如测斜仪、压力计、应变计等,进而推演井筒的变形情况。以下对各方法逐一介绍:

(1) 基于钢丝定向的方法

基于钢丝定向的方法是目目前井筒变形监测最可靠的方法,是在井筒内钢丝锤球构建基准,通过导线传导等方式获取位于钢丝的基准坐标,进而得到内壁上特征点的位置信息,通过对比特征点坐标的变化来分析井筒变形。

(2) 基于激光垂准仪的监测方法

基于激光垂准仪的监测方法是以激光垂准仪代替钢丝锤球构建基准,采用测边交会法测量特征点到激光基准中心的距离,并且计算

特征点坐标。但是该方法成本较高,而且受到激光发散、激光射程有限的制约,有待深入研究。

(3) 基于精密水准变形监测方法

基于精密水准变形监测方法是以精密水准测量为基础,有时也辅以电子经纬仪、全站仪、高精度测距仪等仪器,获取高精度的点位高程和水平偏差。该技术通过定期观测以及比较分析,获取井筒的变形监测信息,达到精密监测的目标。

(4) 基于 GPS 技术的监测方法

井筒变形不是简单的线性,而是多时段非线性的。传统的监测方法是定期地对井筒壁进行监测,并由时段平均值拟合出变形曲线,其缺陷是掩盖了时段内非线性变化。GPS 具有实时性和精确性的特点,可对井筒变形监测点进行全天候、连续、同步的三维变形监测。

(5) 基于传感器的监测方法

在井下无 GPS 信号或者视线条件差的情况下,可使用基于传感器的监测方法,例如测斜仪、压力计、应变计、惯性传感器、分布式光纤传感器,等等。该方法主要是将此类传感器安置于井壁进行常态监测,以此获得井壁变形数据,具有敏感性好,精度高等特点,但该方法造价高,实施方法较为复杂。

此外,针对井筒外部的井塔建筑物,还有井塔倾斜监测技术。这项技术是为了得到井塔的空间位置变化信息,通过偏距差得到倾斜状态,进而推求空间点位的位移信息。作为井筒的地面部分,井塔的变形情况能够深刻地反映出井筒的变形情况。因此,获取井塔的位移信息,对于保证矿山安全生产具有十分重要的意义。

国内对矿山井筒变形监测的研究起步较早,传统的方法主要是利用钢丝定向作为监测基准线直接测量井壁变形,该方法投入少、施测简便且易于各单位独立完成。但由于其测量精度不高,无法监测井壁细微变形,因此,它的广泛使用就受到了限制。随着新技术的出现,逐步发展了利用激光垂准仪替代钢丝垂准仪的监测方法,此外还出现了组合测距仪的监测方法以及精密水准测量的方法。

于志龙等对双激光基准在井筒变形监测中的应用进行了研究,通过布设井筒变形监测网,提出了激光基准的建立和坐标传递的方

法,并对其结果进行精度评定,结果表明,激光基准能够代替钢丝锤球基准应用于井筒的变形监测中,并能获得较高的精度。王坚等通过精密水准方法获得累积沉向量,之后运用空间几何来推求某一位置的倾斜状态,进而算出空间点位的水平位移,从而在进行垂直变形监测的同时,也能获得井塔(抑或井壁中某些部位)的水平位移信息。

20世纪90年代初,国内有关地学工作者开始将GPS技术应用到建筑物、大型基础设施、精密设备等工程变形监测中。近年来,GPS技术被引入到井筒变形监测中,并因其较高的精度已经逐渐被工程技术人员接受。高井祥等采用GPS技术设计矿区井筒变形监测网和实测方案,建立井筒动态变形监测系统,研究利用GIS和GPS的井筒破坏机理与控制方法,并取得一系列研究成果。卢秀山等曾利用GPS对兖矿集团东滩煤矿做过动态变形监测研究,数据成果和分析结果有效。

基于压力传感器进行井筒变形监测的方法,国内学者也做了许多相应研究。隋惠权等在考虑立井罐道的偏斜特点及其形态的前提下,研制了罐道测斜仪,检测立井罐道偏斜及弯曲程度,并在阜新矿务局五龙东风井实测井筒偏斜,获得了与钢丝法吻合的结果。张向东等根据工程需要,在乌山矿副井井筒内壁修复过程中埋设混凝土振弦式应变计进行数据收集,以弹性理论的井壁破坏预测模型为基础,得到了井壁破坏预测的数学模型,进而对井壁的受力变形情况进行了预测分析。黄明利等结合东荣二矿副井井壁治理工程,采用光纤光栅传感技术监测立井井筒受力及变形,确定了光纤监测系统的预警阈值,开发了基于光纤光栅监测的井筒安全状态评价方法和预警系统。

针对无GPS信号等原因,多源传感器融合监测方法的研究逐渐展开,例如惯性导航元件融合其他传感器的方法也是监测井筒变形的一个新的发展趋势。谭建平等设计了一种捷联惯性导航系统(SINS)/旋转编码器/接近开关组合导航式提升容器状态监测系统,解决了井筒内GPS和地磁无法使用的问题,是一个超深井提升容器状态监测的可行方案。

因受井筒内监测环境复杂的影响,测量精度和可靠性很难达到要求,而且全面监测成本昂贵,所以如何利用局部数据和许多假设条件推广到整个井筒、如何确定边界条件和模型来适应井筒复杂环境成为尚待研究的问题。

相比而言,国外矿山井筒监测技术及方法研究起步较早,目前主要集中在变形监测产品的研究,且已有成熟的井筒变形监测产品。例如,德国 DMT 公司采用的矿山井筒惯性测量系统(简称 ISSM)。该测量系统安置在罐笼中,随着罐笼的运动可以较精确地自动测定出罐笼任意时刻的三维坐标,通过测量罐笼坐标的变化计算出罐道偏移,进而推求出井筒移动与变形。意大利 IDS 公司与佛罗伦萨大学合作研发的 IBIS(Image by interferometric survey)系统基于微波干涉技术,综合了步进频率连续波技术(SF-CW)、合成孔径雷达(SAR)技术、差分相位干涉测量技术、永久散射体技术等,可用于矿山边坡、矿区山体、地表以及建筑桥梁等微小位移变化量的监测。

此外,三维激光扫描技术同样可用于变形监测。2006 年,苏黎世联邦理工学院 Schäfer 等利用 Leica HDS 1 2500 型三维激光扫描仪测量隧道壁的位移量,从而对隧道进行变形监测研究;Tsakiri 等利用测体上的测量标志验证了三维激光扫描仪可以检测出 $\pm 0.5\text{mm}$ 的变形量;Armesto 等针对古建筑拱桥的变形监测,在没有任何设计参数的情况下,采用三维激光扫描技术,对点云数据采用统计非参数方法处理,从而获取桥拱的精确几何尺寸,以此来分析桥拱的变形。虽然这些新技术应用在矿山井筒、井塔的变形监测研究中的实例还很少,但对于矿区变形监测具有十分重要的理论借鉴意义。

1.1.2 井筒变形监测分析

井筒变形监测数据是常见的变形监测数据,具有动态、多源、多时空、多尺度、非线性、非稳定等特点,不可避免地含有多种误差(噪声)。如何从动态变形信号中剔除噪声影响,提取出真实的形变信息,从而达到更高的测量精度,已成为研究的重点。近年来,国内外许多专家学者针对动态变形监测进行了数据净化处理方面的研究。现代信号处理方法在解决动态变形监测数据噪声并提取变形信息方