

江苏省自然科学基金 (BK2012129) 资助项目

面向煤矿应急管理的 数据处理关键技术研究

赵作鹏 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金 (BK2012129) 资助项目

面向煤矿应急管理的 数据处理关键技术研究

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

内 容 摘 要

本书从信息科学的角度对煤矿应急管理中的数据获取和分析进行研究,主要包括煤矿日常隐患信息实时管理关键技术研究、灾变后煤矿非自由有限可变异质空间这一特殊环境中基于 WSN 的多参数动态信息采集和传输关键技术研究、煤矿水灾最佳救灾与避灾路线的研究以及 WSN 与 GIS 在煤矿应急管理中数据采集和分析的协同应用研究。

通过对煤矿日常隐患实时管理和预警方面的研究,设计隐患数据自动处理算法,建立隐患管理协同模型、数据挖掘和可视化预警模型,以实现灾变前的事故预防、安全预警以及决策支持。通过对灾变情况下基于 WSN 的信息获取关键技术的研究,设计煤矿井下特殊的有限可变异空间 WSN 覆盖、部署和拓扑控制方案,获取 WSN 的时间延迟规律、设计适应灾变数据获取要求的实时 MAC 协议和实时可靠路由协议,以实现灾变后的数据快速获取,为应急救援提供决策支持。通过对煤矿巷道水灾最佳救灾与避灾路线的研究,在分析优化策略的基础上,设计适应煤矿水灾救援的改进型 Dijkstra 算法,进行逃生路线的动态模拟,并与基于 WSN 的数据实时采集相结合,建立煤矿水灾动态最佳逃生和救灾路径网络模型。通过对 WSN 和 GIS 在煤矿应急管理中的协同应用研究,建立基于 WSN 和基于 GIS 的协同模型和体系框架,设计协同定位算法流程,进行最短路径的协同计算,最终实现灾变情况下数据的快速获取和处理,以辅助安全决策进行应急救援和安全管理。

本书可供大中专院校信息和煤矿安全管理专业师生,以及煤矿安全、机电技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

面向煤矿应急管理的数据处理关键技术研究 / 赵作鹏著. —徐州:中国矿业大学出版社,2013.11
ISBN 978-7-5646-2133-9

I. ①面… II. ①赵… III. ①煤矿—矿山安全—安全管理—数据处理—研究 IV. ①TD7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 274199 号

书 名 面向煤矿应急管理的数据处理关键技术研究
著 者 赵作鹏
责任编辑 章毅 耿东锋
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 6.75 字数 144 千字
版次印次 2013 年 11 月第 1 版 2013 年 11 月第 1 次印刷
定 价 26.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

我国经济发展对煤炭资源的高度依赖,不可避免地带来很多煤矿安全事故的发生。对于不可预测或概率上不可避免的煤矿生产事故而言,有效的应急管理可以大大降低事故损失,否则就会造成事故危害和灾害范围的扩大。

从信息科学的角度对煤矿应急管理中的数据获取和分析进行研究,对实现煤矿安全预警、事故预防以及应急救援中的科学决策具有重要意义。现有的研究在数据获取和分析方面存在如下问题:重灾变应急救援,轻日常隐患管理;重日常数据监测,轻应急信息采集;重瓦斯灾害,轻水灾救援;重数据采集与处理,轻协同应用。针对以上问题,本书力求在大量实际调研和理论分析的基础上,研究日常隐患实时信息管理和预警,以及灾变后基于无线传感器网路(WSN)和地理信息系统(GIS)的数据获取和处理,最终为煤矿安全管理和决策支持服务。

本书的研究成果获省部级科技成果奖 1 项(隐患排查信息管理与决策支持系统,AQJ—5—2—58,国家安全生产监督管理总局第五届安全科技成果奖二等奖),授权国家发明专利 1 项(煤矿隐患定位实时播放监控预警的方法,ZL201010017220.7),软件著作权 6 部。到目前为止还没有一本从信息科学的角度对煤矿应急管理进行全面研究的著作,愿此书能起到抛砖引玉的作用。

本书共分为 6 章。第 1 章介绍研究背景及意义,文献综述,研究目标、内容和技术路线。第 2 章研究煤矿日常隐患信息实时管理关键技术,设计了隐患数据自动处理算法,建立隐患管理协同模型、数据挖掘和可视化预警模型。第 3 章研究煤矿灾变基于 WSN 的信息采集关键技术,设计煤矿井下确定性节点部署和 K 覆盖,进一步研究层次型拓扑控制方法。通过实验和理论分析总结出不同跳数和跳间距的时间延迟规律。针对时延低的要求,设计基于自适应模式切换和退避时间优化的实时 MAC 协议和基于功率调整和多路径 Dijkstra 策略的 WSN 实时路由协议。第 4 章研究基于 GIS 最短路径改进算法的水灾最佳救灾与避灾路线,在经典 Dijkstra 算法的基础上,结合煤矿有限异质可变井巷分布以及对应的水灾情况下的长度当量具体因素,把方向优化算法、分区优化算法以及分级优化算法结合在一起,对 Dijkstra 算法进行改进,建立煤矿水灾动态最佳逃生和救灾路径网络模型,并就动态逃生进行轨迹模拟。第 5 章研究 WSN 和 GIS 在煤矿应急管理中的协同应用,通过整合 WSN 数据采集和 GIS 数据分析的功能,建立 WSN 和 GIS 多层次的协同模型和体系框架,并就协同定位、路径计算进行研究,最终实现灾变情况下数据的快速获取和处理。第 6 章是结论与展望部分,简要叙述针对“面向煤矿应急管理

的数据处理关键技术”研究所开展的主要工作,得出相应的结论,指出本研究的特色与创新点。针对研究方法与结果,进一步说明存在的问题与不足之处。最后指出面向煤矿应急管理的数据处理关键技术的研究展望。

特别感谢北京大学秦其明教授对我多年的培养和指导。在本书成果的研究过程中,我在调研、试验和应用方面得到了冀中能源股份有限公司刘韵矿长的大力支持,以及中国矿业大学研究生陈金翠、王梅和张名媛等研究生的协助,笔者在此一并表示衷心感谢。

由于笔者水平所限,书中缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

笔 者

2012 年 11 月

目 录

1	绪论	1
1.1	研究背景及意义	1
1.2	研究现状及存在的问题	3
1.3	研究目标、内容	13
1.4	研究方法及技术路线	15
1.5	本章小结	18
2	煤矿日常隐患信息实时管理关键技术研究	19
2.1	基于改进编辑距离算法的煤矿隐患数据自动处理	20
2.2	协同软件技术在煤矿隐患排查系统中的应用	24
2.3	煤矿隐患数据挖掘模型及适用挖掘算法	28
2.4	煤矿隐患数据可视化研究	32
2.5	煤矿隐患定位实时播放监控预警的方法	34
2.6	本章小结	36
3	煤矿灾变基于 WSN 的信息获取关键技术研究	37
3.1	WSN 概述	37
3.2	煤矿灾变后的数据快速获取的意义和数据种类	40
3.3	煤矿井下 WSN 节点部署、覆盖与拓扑控制	42
3.4	不同跳数和跳间距的 WSN 时延性能研究	46
3.5	基于自适应切换模式的实时 MAC 协议设计	51
3.6	WSN 实时可靠路由协议设计	55
3.7	本章小结	65
4	煤矿水灾最佳救灾与避灾路线的研究	67
4.1	引言	67
4.2	Dijkstra 算法简介	67
4.3	Dijkstra 算法优化	69

4.4	煤矿透水灾变情况下井巷等效权值的计算	69
4.5	最佳逃生和救援路线的 Dijkstra 算法改进	70
4.6	基于经验权值的动态逃生模拟关键技术实现	74
4.7	本章小结	78
5	WSN 和 GIS 在煤矿应急管理中的协同应用研究	79
5.1	WSN 和 GIS 协同应用整体框架	79
5.2	针对煤矿井下移动节点定位的 WSN 和 GIS 协同应用	81
5.3	基于 WSN 与 GIS 协同的动态最短路径计算	85
5.4	本章小结	87
6	结论与展望	88
6.1	主要工作与结论	88
6.2	特色与创新点	90
6.3	存在的问题与不足	91
6.4	研究展望	91
6.5	本章小结	92
	参考文献	93

CHAPTER

1

绪 论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 我国煤矿安全和应急管理的严峻形势

煤炭在我国一次能源构成中占 70% 左右,“缺油、少气、富煤”是我国能源的基本格局。而且,这种以煤为主的能源格局据预测在今后几十年内不会发生根本性改变。煤矿的建设与发展,在促进当地经济和煤炭产业发展的同时,也带来了新的安全问题。由于我国煤矿地质条件复杂,灾害类型多,一旦发生水灾、火灾、瓦斯爆炸等事故,极易造成群死群伤事故。据国家安全生产监督管理总局的不完全统计,从 1999 年到 2010 年的 11 年间,矿难使 5 万多人丧命。以往的煤矿安全管理和事故案例同时表明,煤矿企业有效的应急管理可以大大降低事故损失,否则就会造成事故危害和灾害范围的扩大。煤矿应急管理的危机形态多样并且复杂,灾变后信息的常规获取方式大多失效,目前学术界不仅对煤矿多样化的灾害形成机理、演化规律、灾变后的信息获取和处理等方面还缺乏基础理论层次的深刻认知,无法对应急科技的可持续发展和提升提供有效支撑,急需开展有针对性的基础研究工作。应开展煤矿应急管理的研究,应做到日常时能够预防安全事故、进行安全预警以及决策支持,灾变救援时,能为煤矿重大灾害救灾指挥人员及时提供各种信息,模拟灾害动态发展趋势,提出救灾可行方案,能有效地辅助指挥员进行科学决策从而最大限度地降低矿井重大灾害带来的经济损失,以及减少人员伤亡。

然而,影响煤矿事故应急管理的制约因素较多,与其他行业相比,煤矿事故的应急管理具有更强的技术性和时效性,以事故救援为主要组成部分的煤矿应急管理是一个庞大而复杂的安全系统工程,仍然有许多基础理论和技术尚待深入研究(周兴龙,2007;侯金玲等,2009;刘文革,2010)。

1.1.2 面向煤矿应急管理的信息获取和分析

《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》中将“重大生产事故预警与救援”确立为“公共安全”重点领域的优先主题,国家“十一五”规划中的矿山救援部分进一步指出了矿山救援急需研究的基础理论和技术。国家自然科学基金委员会在2006年召开了名为“国家突发公共事件应急管理中的科学问题”研讨会,与会专家形成了如下共识(杨列勋等,2007):应急管理的科学问题涵盖了管理科学、信息科学、生命科学和工程科学等众多方面。从信息科学的角度主要研究突发公共事件的信息获取及分析。

信息是煤矿日常应急管理和灾变后事故救援的基础,为避免灾害事故的发生,需要进行隐患的排查和事故的预警,这都离不开信息的获取、加工和分析。另一方面,当灾变事故发生后,救援和决策者首先需要掌握事故的相关信息,这样才能对事故作出快速的应对措施。

煤矿日常应急管理和事故应急救援通过收集、处理和传递信息,并根据信息提供辅助决策。日常应急管理中的数据获取可以利用常规的有线方式,但在灾变情况下的受灾范围信息获取方面,有线方式往往遭到破坏,或者由于断电而无法工作。要实现灾变后的信息监测、减少人员伤亡,亟须引入新技术克服制约煤矿安全和灾害预警水平的问题(刘富强,2003;徐钊等,2004)。

无线传感器网络(Wireless Sensor Network,以下简称 WSN)综合了传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术、分布式信息处理技术等,适用于人员定位、灾难预警与救助、环境控制和生活多样化勘测、信息通信等众多领域(崔莉等,2005;李晓维等,2007;Holger Karl等,2007)。在煤矿井下,尤其是采煤工作面、掘进面和采空区等煤矿安全监测的关键地带,利用无线传感器网络可以克服现有的安全监测、定位系统在部署和进行实时数据采集时的困难,提高煤矿安全生产监测系统在灾变条件下的残存性,实现煤矿采煤与掘进工作面、采空区瓦斯以及人员定位等无线接入检测和灾变后对安全生产监测系统的快速重构(孙彦景,2007;汪炀,2007;王晟,2006)。

另一方面,与地面环境不同,煤矿井下为非自由有限异质可变空间,传输衰减大大高于地面自由空间。电磁波在井下巷道中由于电磁波的反射、衍射、散射及节点的运动都会导致快衰落和码间干扰的发生。路径损耗、衰减和障碍物的存在均会导致慢衰落的发生。此外,煤矿井下尤其是工作面等处,大功率机电设备多,开停频繁,电磁环境复杂,杂散电流干扰大,使电磁波传播衰落的问题更加突出(杨维等,2001;范迪等,2007;张申,2002;黄伟等,2003;杨维等,2004)。

在煤矿井下,不同类型的巷道和采煤工作面组成了矿井的立体空间网络。巷道按用途分为运输大巷、运输上(下)山、井底车场、通风巷道、联络巷道、休息区等,巷道断面形状又有矩形、半圆形、椭圆形等。不同用途的巷道配有不同附属装置,如运输大巷装有轨道、排水沟以及电力通信缆线等。采煤工作面中,顶板、底板以及侧壁挡板均为金属,另

外一侧壁是煤壁。因而,不同的井下巷道环境具有不同的电磁波传播和衰减规律,煤矿井下的无线通信模型具有地理相关性。

此外,灾变情况下的应急救援对信息采集的时间延迟有特殊的要求,然而目前有关 WSN 时间延迟性能的研究较少。如何在保证灾变数据采集和传输的前提下,实现满足要求的低延迟性能,是解决应急救援的瓶颈问题之一。因而,研究 WSN 井下非自由有限异质可变空间的部署和覆盖,实时介质访问控制(Media Access Control,以下简称 MAC)协议和路由协议的设计,对煤矿应急救援具有重要意义。

地理信息系统(Geographic Information System,以下简称 GIS)在应急管理应用方面已经得到了大量研究,并在城市应急救援、交通应急管理、洪灾应急救援等领域得到具体应用。由于煤矿井下生产和灾变后环境的复杂性,以及煤矿水、火、瓦斯、煤尘等灾害类型的多样性,对煤矿灾害预警、机理和模拟还缺乏全面和深入的研究,煤矿应急管理中的 GIS 应用目前还仅仅停留在事故点、救援设备等信息的分布查询和逃生路线的应用方面,没能研究和利用 GIS 空间分析和可视化的功能进行日常隐患信息管理和灾害预警,并缺乏将 GIS 和 WSN 一起进行深入研究。因而,将 GIS 应用于煤矿应急管理数据分析和处理,还有很多科学和技术问题尚待研究。

综上所述,在煤矿应急管理方面,研究 WSN 和 GIS 协同多参数实时动态采集以及分析处理,将辅助应急管理中的安全决策,有力促进煤矿安全生产。

1.2 研究现状及存在的问题

1.2.1 国外研究现状

国外应急管理相关文献较多,但针对煤矿的较少,主要原因是发达国家的能源结构以石油为主,并且往往对自然条件差的矿井采取关闭或放弃开采的措施,大部分煤矿机械化和自动化程度较高,很多煤矿实现了无人值守。国外学者对应急救援、灾害成因及预防控制、应急运筹和管理学、灾变后的信息获取和分析等诸多领域进行了大量研究。下面就基于 WSN 的应急数据采集、基于 GIS 的应急数据分析以及其他方面的应急管理研究现状进行论述。

1.2.1.1 基于 WSN 的应急管理数据获取研究现状

将 WSN 应用于应急管理,国外学术界在火灾、地震、恐怖活动等应急事件救援中数据采集、应急通信等方面已有了很多研究。Sanson 等人基于灾变下的位置信息获取特点,提出了灾变下被困人员基于 WSN 的定位方法(Sanson 等,2005);Boukerche 等人使用数据融合等手段,给出了实现 WSN 应用层语义一致性解释的方法(Boukerche 等,2006);Michaelides 研究应用 WSN 确定大范围扩散应急事件中事件源的位置,通过非线

性最小二乘法对事件源位置进行估计(Michaelides 等,2006);Lim 等人研究将 WSN 应用于火灾监测和救援,并提出了相应框架(Lim 等,2007);Wilson 设计了城市火灾监测的 WSN 原型系统,并开发了移动人员和指挥中心的通信接口,通过该网络可以监测火灾事件中位置、环境参数等信息,并可以进行应急通信(Wilson,2008);Charvat 提出应用 WSN 获取信息实现电子矿图信息的动态变化,以辅助应急下的安全决策(Charvat 等,2008);Sathyan 使用单一通信频率和 TOA 方法,并设计了新的算法来实现协同定位(Sathyan 等,2008);Soyturk 针对军事作战中对 WSN 数据采集可靠性和实时性的要求,提出了能效效率和可靠性实时数据获取方法(Soyturk 等,2008);Jafarian 针对煤矿的应急情况,通过为应急和非应急数据流配置不同的有限队列,用少量的网络生存时间代价换取高可靠性和低延时,提出了低延时和长生存时间的 WSN 路由协议(Jafarian,2008);Boukerche 等人针对 WSN 在军事和其他应急事件中的安全问题,提出了安全的定位算法应对攻击(Boukerche 等,2008);Chandra-Sekaran 等人针对危机时间响应存在的问题,设计了监测病人位置和空气温度的 ZigBee 传感器网络,使用蒙地卡罗定位算法实现大量受灾人员的定位(Chandra-Sekaran 等,2008);Ferrara 研究灾变情况下数据获取,通过地面 WSN 来矫正遥感数据,提出低耗的 WSN 设计思路(Ferrara,2009);Garcia-Morchon 研究无处不在的 WSN 应用于健康监控时安全和隐私的保护,提出了三层结构的安全框架(Garcia-Morchon 等,2009);Erman 等人通过设计六边形的蜂窝拓扑结构来解决应急报警数据低延迟传输问题(Erman 等,2010);Calafate 针对为评估 WSN 的实时性能,开发了时间发生框架(Calafate,2010);Sung 通过基于模糊神经网络的多传感器数据融合算法实现火灾可能性预警(Sung,2010);Cherniak 研究通过自适应的传感网络数据管理实现火灾应急疏散(Cherniak,2010)。

上述众多研究主要针对城市中各类突发性事故灾害,实现位置、环境参数等数据的获取,但对煤矿领域的突发灾害事故研究较少,所研究的成果也无法应用于具有特殊环境特征的煤矿井下。

1.2.1.2 基于 GIS 的应急管理数据处理和分析研究现状

采用 GIS 的应急系统是在已有数学物理模型的基础上,选择适当的数值计算方法,对危险单元或系统进行模拟,预演事故的发生过程及事故后果的影响范围,从而能更加形象直观地认识所评价单元或系统的危险及危害性,为决策提供客观依据(王晓宇,2007)。将 GIS 应用于应急管理,国内外学术界在应急疏散、灾情蔓延模拟、路径分析等方面已有了很多研究。在应急疏散方面,Lin 等人采用 Gawron 提出的排队模型仿真灾害发生时交通的聚集及疏散(Gawron,1998),使用 GIS 工具对疏散时交通流的优化和调配进行处理(Lin 等,2004);Cova 提出了一种基于 CCM 模型的方法来判别社区人员疏散时的潜在危险区域,并利用 GIS 实现整个模型框架(Cova,1997)。在火灾应急管理方面,Bryant 提出了一个损失评估计算机模拟模型 FIRE-SPREAD,用于估计城市火灾的蔓延。该模型与 GIS 系统结合以产生彩色图形输出,并描绘模拟某一时间段内的火灾蔓延

(Bryant,1993)。在危险和事故后果评价模拟等方面,Aeosta 将 GIS 应用于城市公共卫生和健康事件的应急中,取得显著的效果(Aeosta,2006)。Fahad 认为 GIS 的应用大大加快了对应急事件的响应速度,使事故损失得以减少(Fahad,2004)。Ng 等将 GIS 技术应用于城市交通事故的评价和分析中,对最佳救灾路线的确定提出了新的计算模型(Ng 等,2005)。Gheorghe 运用 GIS 技术就危险物质铁路运输的应急问题进行了分析,提出了基于 GIS 的解决方案(Gheorghe,2005)。Aemal 等人探讨了基于 GIS 技术确定火灾影响范围的问题,进而提出了事故可视化模拟的可能性和具体方法(Aemal 等,2005;Liu 等,2006)。Roper 等人运用 GIS 系统对油气输送管道进行了危险性评估(Roper 等,2005;JO 等,2005)。

同样,上述有关 GIS 的应急救援研究也主要集中于城市的应急救援和管理,很少针对煤矿特殊的空间特征进行研究,并很少与 WSN 结合起来进行研究。

1.2.1.3 其他方面的研究现状

(1) 事故致因理论方面的研究现状

通过研究事故应急致因理论来切断事故发生的因果链,在日常危机管理中十分重要。国外这方面的研究成果十分丰富,主要是应用系统论的观点和方法去研究事故过程,分析事故致因和形成机理,研究事故的预防和控制策略,以及事故发生时的救援措施等,先后提出了事故倾向论、事故因果连锁论、能量意外释放论、事故致因突变论、轨迹交叉理论等比较有影响的理论或模型。

从事故致因理论的研究趋势来看,早期的事故致因理论往往将工人的行为看做是导致事故发生的主要原因,并且强调对事故因素的统计研究。20 世纪 50 年代兴起的人机工程学开始重视机器和物质环境的危险性,强调实现生产条件、机器设备的固有安全。到了 80 年代,人们又将事故看做是人的不安全行为和物的不安全状态两大因素相互作用的结果,取得了一些重要研究进展。进入 90 年代以来,国外学者更加强调人因在事故形成中的作用,开始通过建立复杂因果系统模型来分析事故成因,发表了许多文献。如美国安全工程师 Heinrich 提出了“海因里希十条”的工业安全公理,阐述了人的因素与物的因素之间的关系、不安全行为产生及预防措施、事故预防与其他管理机能之间关系等问题(Heinrich,1980),对安全管理研究的影响很大。英国心理学家 Reason 首次提出了“潜在错误(Latent Failures)”的概念,并且认为系统中任何技术失效或人误只是事故的必要而非充分条件,只有当多种人误或技术失效的发生时间重合时,才有可能引发事故,潜在错误是事故的“贡献”因素之一(Reason,1990)。Dan 构建了一个新的事故成因模型,该模型将人的因素看做是导致事故的最基本原因(Dan,1996)。Britkovl 等人研究了重大工业事故中社会因素,如监管部门职能和机制、经济和法律等的影响,以及这些社会因素在人为事故的发生过程中扮演的作用(Britkovl 等,1998)。Willialn 等人则通过对案例的分析,介绍了一些灾害的成因、现状和趋势(Willialn 等,2002)。

但是,西方的事故致因理论研究很少涉及煤矿方面,煤矿生产具有很强的特殊性。

此外,上述事故致因方面的研究很少涉及次生灾害的演化规律,尤其在煤矿的众多灾害方面。

(2) 管理、经济和社会学方面的应急管理研究现状

在管理和经济学科方面的应急管理研究,主要集中在应急决策、物流、事故评估等方面。Linda 等人对有关应急管理领域的运筹学/管理学模型和应用进行了详细的回顾,详细介绍了这些研究工作的背景、内容和性质,追踪了这些原始模型在何种程度上仍在影响着应急反应的决策(Linda 等,2004)。Wei 等人研究了由灾害救援活动所产生应急物流问题,将应急物流问题分解为两阶段决策:线路设计和多商品流分配,设计了基于蚁群优化的启发式算法,并与 CPLEX 算法在求解质量和计算时间上进行了比较(Wei, 2007)。Tzeng 等人应用模糊多目标规划研究了救灾物资分配问题,模型有三个目标:最大限度地减少总成本,尽量降低总旅行时间,并最大限度地满足最低保障,其中前两个是效率目标,而第三个是追求公平,以确保救济物资运送到各需求点(Tzeng 等,2007)。Sheu 提出应用基于混合模糊聚类优化方法的应急物流的联合分配来动态响应应急救援阶段的紧急救济需求,在给定的三层救济供应链上,将问题分解为两个递推阶段:灾害影响地区分组和救灾协调分配(Sheu,2007)。Chiu 等人研究了突发灾害情形下多优先组的实时应急反应问题,同时考虑了目的地动员、交通分配和出发时间确定,建立了适合大规模网络的基于细胞传输模型的线型规划模型(Chiu 等,2007)。Chang 等人为政府机关防洪应急物流规划建立了一个决策支持系统,将不确定性的防洪应急物流转化为两个随机规划模型,通过应用地理信息系统的数据处理和网络分析功能,估算出救援需求点的可能地点和所需的救援设备(Chang 等,2007)。

1.2.2 国内研究现状

由于我国经济发展上对煤矿资源的高度依赖以及我国煤矿事故的频发特征,国内煤矿应急管理方面的研究较多,研究内容涉及安全技术、事故致因、安全管理、应急预案、应急预案、应急评价、应急监测和通信、应急避灾路线和应急信息系统开发等众多方面。下面就基于 WSN 的煤矿应急监测和通信、基于 GIS 的煤矿应急管理数据处理分析以及其他方面的应急管理研究现状进行论述。

1.2.2.1 基于 WSN 的煤矿应急监测和通信研究现状

由于煤矿井下是非自由空间,掘进巷道、采煤工作面以及采空区的环境条件对无线传感器网络提出了特殊的要求和挑战,现有的无线传感器网络通信平台,在应用对象、信道条件、实现目标上都与矿井无线监测的具体要求存在很大的差别,难以可靠、有效地满足矿井无线安全监测的需求(杨维等,2006),无线传感器网络在煤矿的应用还处在初级阶段。

目前理论方面的研究主要集中在以下三个方面:

(1) 矿井无线通信信道模型及衰落特性的研究。井下巷道断面狭窄,支护形式多样,

巷道壁粗糙,传输的信号受地形、地物的影响而产生绕射、反射、散射及吸收现象,电磁波在井下巷道中衰落严重,无线通信距离短(杨维等,2001)。矿井地下无线通信系统的研究与电磁波传输的测试与理论研究也都取得了一定的成果(张申,2002;孙继平等,2003),主要研究了不同频段的窄带电磁波在巷道中传播时巷道的截面、弯曲、倾斜等对电磁波传播衰落特性的影响。刘晓文在分析液压支柱对电磁波影响的基础上,建立异质可变空间无线电波传输定律,建立了通信模型;提出煤矿井下 MAC 协议应能在随机竞争模式和 RTS/CTS 模式切换的协议思想,推导了作为切换门限的碰撞概率的计算公式,设计实现了自适应切换 MAC 算法(刘晓文,2009)。以上研究虽然在建立井下复杂环境中无线信号的信道通信模型方面,做了很多工作,但是由于煤矿井下是不同类型的巷道组成的立体空间网络,以上研究很少考虑通信模型的地理相关性。

(2) 矿井无线传感器网络的拓扑结构与相应的拓扑控制机制。随着煤矿开拓和掘进的进行,布置传感器网络的范围也会发生变化,一些节点将被回收或随着能量的耗尽而退出网络,同时又不断有新的节点加入;同时携带节点的人员具有流动性,因此拓扑变化频繁。不同区域需要监测的具体内容、监测节点的位置结构关系可能有较大的差异。高丽强等人把同一采煤工作面的节点组成一个簇,在每一煤层中固定设置一个外接电源的节点作为层首,来协调控制煤层内的数据传输和路由维护,层首和层首之间建立主干路由(高丽强等,2007)。以上在研究拓扑结构和控制机制时,很少考虑煤矿井下特殊的立体空间网络中 WSN 节点部署和覆盖问题。

(3) 矿井无线传感器网络的协议。随着掘进和开采的深入,新的传感器节点的加入和旧节点的移去或失效经常发生,因此要求网络具备很好的拓扑重构、路由更新的性能。常规 WSN 节点能量受限,路由协议设计一般优先考虑如何降低节点的能耗(孙利民等,2005;李建中等,2003),而井下 WSN 的网关节点可通过有线方式供电,并且传感器节点可由矿灯电池供电,并能够进行有效地维护、更新或更换电池,所以井下 WSN 不以追求能量高效为主,更加强调可靠性、健壮性以及应急情况下的实时性。李伟兵设计了满足井下数据传输要求的路由协议——同向梯度路由协议(SDG);针对矿井巷道带状分布的特点设计了基于接收信号强度指示的井下人员辅助定位方法(李伟兵,2009)。煤矿安全生产中的数据监测具有突发性和区域相关性的特点,险情的发生将导致局部安全参数的剧烈变化,此时需要对监测数据密集采样,因而需要实时可靠的路由技术,保证监测系统报警的及时有效性。现有的能量感知、定向扩散和谣传等基于查询的路由协议,GEAR 和 GEM 等基于地理位置的路由协议等,是以一般的 WSN 作为研究对象的。而且以上网络协议的研究,主要针对于非灾变的正常通信模式,而很少关注灾变模式中 WSN 要满足实时性、连通性等要求。

在技术应用研究方面,孙恩吉等人设计了基于无线射频识别技术和无线传感网络技术的平台,实现井下工作人员、井下移动设备的三维定位,实现井下巷道工作环境的各种参数(如温度、湿度、井巷通风风速、有害气体含量等)的实时监测,为灾后救援工作提供

有价值的决策参考(孙恩吉等,2009)。张燕燕介绍了一种基于无线传感器网络的矿井应急通信系统的设计方案,进行紧急状态下矿井数据的采集和收集(张燕燕,2008)。王安义等人基于短距离无线通信技术的井下应急救援无线通信监测系统,提出了一种快速无线信道的建立方法(王安义等,2009)。该方法通过短距离无线技术,以无线接力方式通过自动投放装置来快速建立无线通信信道,能够快速、准确地获取灾难现场的关键信息数据和现场状态信息,以便营救人员组织实施营救工作。郑万波等人针对国内现有救援指挥通信监测系统存在的不足,依据国家矿山事故灾难应急预案和救护规程的相关规定,分析了煤矿企业应急救援指挥流程,并进一步提出了信息流传输模型,设计了新型救援指挥通信系统以解决应急救援中信息传输问题(郑万波等,2009)。刘晓文等人针对目前井下语音通信系统的现状,设计了一种基于无线语音传感器网络的矿井应急语音通信系统,该系统以 SPCE061A 和 CC2420 芯片为核心设计传感器节点,结合 CAN 控制器 SJA1000 设计 Sink 节点,并对网络通信协议进行了分析,给出了系统的硬件设计和软件流程(刘晓文等,2010)。郑万波等人针对现有矿井应急救援通信指挥装置电池供电的局限,提出了休眠唤醒功能设计方案(郑万波等,2010)。

1.2.2.2 基于 GIS 的煤矿应急管理中数据处理和分析的研究现状

应急管理离不开 GIS 的深入研究和应用。由于煤矿灾害多样,机理各不相同,煤矿应急管理主要集中在避灾路线、火灾扩散模拟、信息平台开发方面,缺乏针对基于 GIS 的煤矿应急调度、预警、水灾灾情演化模拟等方面的研究。

在应急避灾路线方面,王德明等人根据灾情的发展情况,将避灾路线分为三种类型,即理想的避灾路线、可行的避灾路线和逃生的避灾路线。对不同类型的避灾与救灾路线的可通行性提出了判别计算式,对影响井巷通行速度的各种因素进行了分析并建立了相应的计算模型,还提出了求解最佳救灾与避灾路线简便适用的新方法(王德明等,1994)。李兴东等人分析了矿井发生火灾后的常用避灾方法,提出了遇灾人员在火灾情况不明时的应急途径,以及相应的火灾避灾、救灾措施,推导出了避灾独头巷道内空气维持避灾人员生命极限时间的计算方法,并针对现有矿井火灾时期避灾路线求解软件存在的不足,提出了通过判定有烟巷道、判定安全地点、计算最短路线、自动选择避灾安全地点和求解避灾路线的方法(李兴东等,2001)。孙佳等人针对应急救援中的最佳避灾路线选择这一重要问题,提出了最佳路线选择的改进的 Dijkstra 算法(孙佳等,2005)。付恩俊等人对煤矿井下火灾事故应急救援的避灾路线的原则、选择方法、编程算法及辅助决策进行了论述(付恩俊等,2006)。孙臣良利用邻接表数据结构建立了矿井巷道网络的存储模型,提出了最佳路线选择的启发式搜索算法,并采用 VC 语言开发了功能完善的系统程序(孙臣良,2007)。王玉琨等人在分析 Dijkstra 算法的基础上,根据矿井巷道平面网络的特点,从限制搜索范围和搜索方向着手在扇形区域内寻找最短路径,完成了对矿井应急救援中最佳避灾路线的 Dijkstra 算法的优化,提高了搜索速度和运行效率(王玉琨等,2008)。

在应急救援软件系统开发方面,程平等探讨了基于组件式 GIS 和 GSM 等技术的煤矿应急救援指挥通信平台的设计与实现,以 HotGIS 作为主要 GIS 技术,利用 Microsoft .NET 平台下的 C#.NET 作为核心开发语言编程实现(程平等,2005)。马玉晓针对目前矿山突发事件的特点和 WebGIS 的功能,详细阐述了 WebGIS 支持下的矿山安全事故防范应急系统基本原理,设计了 WebGIS 支持下的面向矿山安全突发事件防范应急系统总体框架和系统各应用平台功能(马玉晓,2006)。王铃丁等人针对煤矿事故应急预案开发了矿井应急资源管理、应急预案演练和救灾辅助指挥系统,该系统实现了对应急管理机构、救援物资、救护装备的自动化监控与管理;通过预案演练子系统提高了煤矿的安全管理、应急响应和安全培训的效果;通过实时救灾指挥子系统辅助决策指挥人员启动预案,提高了应急救援响应的能力(王铃丁等,2006)。高蕊等人通过对矿井情况的全面了解和矿井灾害应急救援技术的研究,利用地理信息系统控件 mapx 建立了可视化的矿井灾害应急救援系统,系统拥有内容丰富的数据库和知识库,将井下危险源、工作面、避灾路线、灾害影响区域、通讯设备分布等与矿井救灾密切相关的信息在地图上动态显示,并且将其属性信息与图形信息紧密结合(高蕊等,2007)。李希建等人以 GIS 与 VB 6.0 为开发平台,采用管理信息系统原理和 GIS 软件建立了可视化的煤矿灾害应急救援系统。该系统能将煤矿井下的危险源、工作面、避灾路线、灾害影响区域、通讯与救灾设备分布等与矿井救灾密切相关的信息都在地图上动态显示,并能实现远程互动救援(李希建等,2008)。栗继祖等人分析了煤矿安全生产事故应急预案存在的问题,提出发挥应急预案作用的关键技术:用可靠性理论对危险源重新评估,引进计算机网络技术实现危险源实时监控,建立事故应急响应平台(栗继祖等,2008)。郭德勇等人针对煤矿应急救援信息存在分散管理、共享性差等问题,采用 Oracle 为底层数据库,结合 B/S 模式开发了煤矿应急救援信息管理系统,探讨了煤矿应急救援的计算机一体化、系统架构等问题,描述了应急管理系统的信息分类、功能、B/S 模式设计和系统实现过程(郭德勇等,2009)。何远富等人提出了以应急联动服务平台为核心的矿山安全应急联动系统的体系结构。该系统集通信、指挥和调度于一体,是高度智能化的矿山应急指挥调度系统(何远富等,2009)。孙保敬等人提出一套针对煤矿突水问题的排水抢险应急救援方案,该方案涵盖了排水系统设计与选型决策支持,以及抢险排水应急方案的快速自动生成、快速实施及矿用设备运行的实时故障诊断和监测(孙保敬等,2009)。吴兵等人针对传统 C/S 结构的煤矿应急救援信息系统程序繁杂、存在着固有的安全隐患、效率低的缺点,提出了一种基于 B/S 结构的系统设计及实现方法(吴兵等,2009)。刘文革等人基于 WebGIS 煤矿事故救援系统的技术架构、关键技术,开发将应急信息管理、应急演练、应急救援等业务融为一体的救援系统,利用 WebGIS 的空间分析能力,实现煤矿事故救援的可视化,为煤矿事故救援提供科学、准确、综合的信息支持(刘文革等,2010)。

1.2.2.3 其他方面的研究现状

(1) 有关安全技术和事故致因机理方面的研究现状

安全技术方面的研究较多,对瓦斯、煤尘、透水、煤炭自燃等主要煤矿灾害的技术性防控研究,已形成一整套比较完善的安全技术理论体系,在矿井瓦斯突出防治技术、矿井瓦斯抽放技术、矿井防灭火技术、矿井通风系统优化技术、矿井水防治技术、矿井顶板控制技术、矿井信息采集技术等领域取得了大量的成果(张秉义,1993;周世宁等,1994;俞启香,1994;赵衡阳,1996;蒋承林等,1998;林柏泉,1999;俞启香等,2000;程远平等,2002;林柏泉,2003;程远平等,2003;付建华,2005;何学秋,2005)。

在事故致因方面,于殿宝等根据系统工程理论和安全工作经验分析指出,触发事故的真正原因主要是生产过程中物的不安全状态、生产环境的不安全因素、操作者的不安全行为和管理缺陷或混乱等四大因素,其中安全管理是最重要的要素(于殿宝等,1997)。曹琦运用人机环境工程学理论作为分析工具,提出“实现安全生产的基本原理就是实现人、机、环境三者安全本质达到最佳匹配,即系统本质安全化”,并且认为人机环境系统本质安全化的程度取决于安全管理的水平(曹琦,1997)。许开立等人运用资料证明,80%以上的事故由人的不安全行为所致,并提出安全管理的重点应放在控制人的不安全行为;由此,他们开发了安全心理测试系统,作为安全培训以及某些职业适合性测试的重要手段(许开立等,1997)。金磊研究了我国20世纪工业,包括煤矿开采业的安全状况,从社会环境、经济环境,以及管理机制等方面分析了事故发生原因,最后提出了强化生产事故预防、强化法制约束、强化安全文化教育等改善21世纪工业安全管理的对策(金磊,1999)。尹贻勤结合煤矿安全问题的实际,探讨在煤矿事故特别是人身伤亡事故的致因中,人的心理和行为因素的产生原因、表现形式、作用规律及控制措施(尹贻勤,1992)。林泽炎在研究中发现:不管是国家统配煤矿、国有地方煤矿,还是乡镇(含个体)煤矿,人为冒险造成的事故数量和死亡人数均高于偶然突发事件的数量和死亡人数,认为人的意识、情绪等心理因素是导致事故发生的主要原因(林泽炎,1998)。陈宝智提出了两类危险源事故致因理论,第一类危险源是一些物理实体,第二类危险源是围绕着第一类危险源而出现的一些异常现象或状态(陈宝智,2002)。张力等人提出了“安全流变理论”,并描述了煤矿事故的安全流变特性(张力等,2001)。

在煤矿重大灾害机理方面,邢玉忠建立和完善了矿井重大灾害灾变过程数值计算理论,开发了矿井日常通风模拟系统,完成了“可视化矿井坐标点的自动录入系统”和“网络解算结果到可视化矿井的数据传输系统”,将可视化矿井信息与网络化矿井通风信息的实质结合,实现了风流在可视化矿井的各条巷道上的动态显示(邢玉忠,2007)。

(2) 有关安全管理、应急预案、预警和评价方面的研究现状

在安全管理方面,徐向东从哲学角度对安全意识的概念进行了剖析,探讨了安全意识的构成与运作机制及其对事故发生的影响,提出了新世纪的安全观念(徐向东,2003)。毛海峰通过对有意违章行为产生的动因进行了分析,提出了有意违章行为的动因(毛海峰,2003,2004)。黄清武提出对事故中人的不安全行为采取干预技术,运用安全心理学进行安全教育,运用安全人机工程学使人、机、环境匹配,同时加强领导管理使作业标准