

# 大功率掘进机危险区域报警系统设计与实现

宗伟林<sup>1</sup> 陶洪钧<sup>1</sup> 王琪<sup>1</sup> 杜向阳<sup>2</sup> 陈硕<sup>1</sup> 姚乐<sup>1</sup> 赵星杰<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 山西潞安环保能源开发股份有限公司 王庄煤矿, 山西 长治 046031)

**摘要:** 针对大功率掘进机工作时其周边作业人员无意识进入掘进机危险区域以此带来安全隐患, 甚至引发人身安全事故的问题, 开展掘进机危险区域报警系统的研究。该系统以电磁场理论为基础, 利用低频电磁波作为测距媒介, 采用检测电磁波强度及三边定位算法确定井下作业人员的位置, 并判断是否在危险区域。系统选择 STM32F103 嵌入式 ARM 作为控制芯片, 由安置在掘进机上的集中式数据处理装置和工作人员随身携带的移动监测装置 2 部分组成。通过对样机的模拟试验测试, 在 0.5~4.0 m 内人员定位判定平均误差为 4.3%, 实现了危险区域的定位与报警。

**关键词:** 掘进机; 危险区域; 报警系统; 低频电磁波; 三边定位法; 嵌入式系统

**中图分类号:** TD67 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2014)09-0072-05

## Design and Realization on Danger Area Warning System of High Power Roadheader

ZONG Wei-lin<sup>1</sup>, TAO Hong-jun<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>1</sup>, DU Xiang-yang<sup>2</sup>, CHEN Shuo<sup>1</sup>, YAO Le<sup>1</sup>, ZHAO Xing-jie<sup>1</sup>

(1. School of Information and Electric Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Wangzhuang Mine, Shanxi Lu'an Environmental Energy Development Corporation Limited, Changzhi 046031, China)

**Abstract:** According to a safety hidden danger occurred when operation personnel no intention closed to the roadheader as a roadheader was in operation, even a personal safety accident occurred, a study on a danger area warning system of the roadheader was conducted. Based on an electromagnetic field theory as a base, a low frequency electromagnetic wave was applied to the medium of a distance measuring and a detection of electromagnetic wave strength and the three side positioning algorithm were applied to determine a location of the operation personnel in the underground mine and to judge the personnel in or not in the danger area. The STM32F103 embedded ARM was selected as a control chip. The system was composited with a centralized data processing device on the roadheader and the portable mobile monitoring and measuring device with the operation person. With a simulation experiment measurement of the prototype, in a personnel positioning judgement within 0.5~4.0 m, an average error was 4.3% and a danger area positioning and warning could be realized.

**Key words:** roadheader; danger area; warning system; low frequency electromagnetic wave; three side positioning method; embedded system

## 0 引言

随着我国煤炭企业现代化建设的不断推进, 煤炭生产装备也得到了快速发展。为了提高掘进效率, 近年来许多煤矿引进了各种大功率掘进机, 例如 EBZ-260 型掘进机<sup>[1]</sup> 因具有机身长、宽度宽、自重、截割面大、截割硬度大等特点, 在煤矿得到普遍应用。根据《煤炭安全规程》<sup>[2]</sup> 第 71 条规定和《煤矿掘进机司机操作规程》<sup>[3]</sup> 要求, 掘进机在工作和检修时, 周边一些位置不允许人员进入, 这些位置组

成的区域称之为危险区域, 现行措施是设置监护人员和警示牌防止人员误入。大功率掘进机体积大、动力强劲, 工作噪声大、尘雾大, 受现场条件限制, 掘进机作业时人工监护的范围受到限制, 会发生看护不及时、呼叫听不见, 或工作人员无意识进入危险区域的情况, 这对现场工作人员的安全造成很大威胁, 影响生产作业安全。根据国家安全生产监督管理总局网站数据统计, 在 2006—2010 年我国煤矿发生死亡 5 人以上煤矿事故中, 有 19.4% 发生在掘进工作面, 死亡人数占 24.5%, 而其中 80% 以上的事故直接或

收稿日期: 2014-05-24; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2014.09.0016

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划) 资助项目(2012AA062104); 国家级大学生创新训练计划资助项目(201310290021)

作者简介: 宗伟林(1963—), 男, 江苏常州人, 副教授。Tel: 13382665296, E-mail: cumtzw@126.com

引用格式: 宗伟林, 陶洪钧, 王琪, 等. 大功率掘进机危险区域报警系统设计与实现[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(9): 72-76.

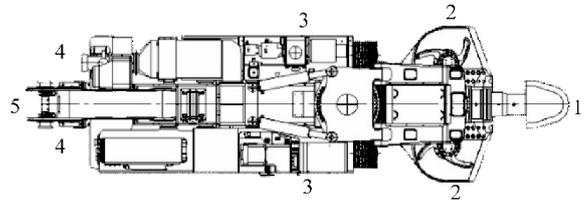
ZONG Wei-lin, TAO Hong-jun, WANG Qi, et al. Design and Realization on Danger Area Warning System of High Power Roadheader[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(9): 72-76.

间接源于生产环境因素影响而导致的作业人员不安全行为。国外煤矿井下大型装备也偶尔发生人机碰撞安全事故, 据统计, 自 1984 年大型连续采煤机应用以来, 美国矿业开采行业已经出现了 30 多起人机间的挤碰和碾压事故, 导致人员伤亡严重<sup>[4]</sup>。为避免此类事故的发生, 美国、加拿大、南非等国家已开始致力于研究煤矿危险区域检测和人机碰撞告警的相关技术及系统装置。美国矿山安全与健康监察局 (MSHA) 已于 2011 年正式立法规定所有矿山机械强制安装此类近距离检测系统。美国某公司研制出 HazardAvert 的接近检测和碰撞避免装置, 其利用甚低频 (VLF) 检测技术防止碰撞事故发生<sup>[5]</sup>。美国某公司研制出 IntelliZone 的智能动态区近感探测系统, 其利用先进的矩阵技术和精细的软件算法进行人员精确定位<sup>[6]</sup>。南非某电子公司利用射频 (RF) 技术研制了 CWS800 碰撞预警系统<sup>[7]</sup>。以上文献主要讲述系统功能, 未涉及实现的技术细节。在 20 世纪 90 年代末期, 兖矿集团和天津某矿用电子设备厂, 针对当时国内普遍采用的 S100 掘进机研制开发了一套安全预警系统, 实现开机前的预警, 但不能满足进入危险区域报警需求<sup>[8]</sup>。笔者根据电磁波强度随传播距离的增大而衰减的特性, 通过工作人员随身携带的个人报警装置 (简称 PAD) 检测由掘进机上固定的多个信标节点发射的低频电磁波强度, 得到工作人员与不同信标节点之间的距离, 并通过三边定位算法对人员进行定位, 判断是否处于危险区域, 为掘进机危险接近提供了一种新的方法。

## 1 掘进机危险区域确定

以 EBZ-260 型掘进机为例, 掘进机的动作方式有截割动作、装运动作、行走动作。截割动作时, 截割机构通过截割电动机驱动截割头旋转, 利用升降和回转液压缸实现截割头的上、下、左、右运动, 来完成所需要巷道断面的截割。装运动作时, 装载部通过铲板星轮的连续旋转运动, 将截割的煤岩装载到刮板输送机上, 并通过后配套的转载机将煤岩运出巷道。行走动作时, 行走机构通过液压电动机驱动链轮带动履带转动, 来完成掘进机的前进、后退、左右转弯等各种运动, 并能够实现高低行走速度的切换。《EBZ-260 型掘进机使用维护说明书》中明确规定了掘进机的主要危险区域, 如图 1 所示, 在掘进机工作期间, 任何人不允许在掘进机危险区域内停留, 否则可能导致严重的伤亡事故, 且在机器通电后必须时刻观察这些区域是否有人。

为便于分析人员是否进入危险区域, 建立了掘



1—截割头两侧、下方、前方; 2—装载机构上方、两侧; 3—履带两侧; 4—刮板输送机尾转载处两侧及后方; 5—刮板输送机链条上方

图 1 EBZ-260 型掘进机主要危险区域

进机危险区域坐标模型, 如图 2 所示, 以掘进机车尾中心处为坐标原点建立直角坐标系, 取掘进机左侧方向为  $y$  轴正方向, 车头正前方向为  $x$  轴正方向。根据 EBZ-260 型掘进机实际尺寸 (宽 3.6 m、长 12.5 m) 以及截割臂最大左右摆动角度 ( $32^\circ$ ) 等参数, 确定距离掘进区 1 m 之内为停机区, 即如果有人在这个区域 (司机除外), 则掘进机停止工作。停机区以外 2 m 为预警区, 人员进入预警区则报警但不停机。停机区和预警区统称为危险区域, 所有在危险区域的人员, 都可以通过检测所在位置的电磁波强度, 计算出精确的坐标, 即实现在掘进机危险区域的人员定位。

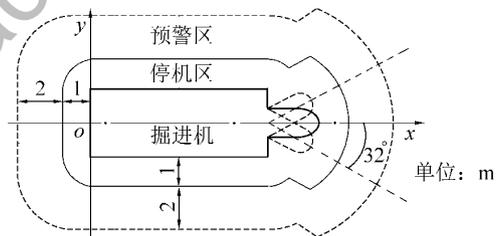


图 2 掘进机危险区域坐标模型

## 2 掘进机危险区域人员定位原理

### 2.1 电磁波强度和距离的关系

低频电磁波具有较好的绕射性<sup>[9-10]</sup>, 适合在井下狭窄硐室且有大型机械的空间中传播。因在井下存在低频电磁干扰信号, 所以需要用于测距的电磁波信号既可以穿过障碍物, 又能避免低频干扰信号。掘进机危险区域接近报警系统选择 70 kHz 作为测距用的电磁波信号频率<sup>[11]</sup>, 该电磁波称为标记电磁波, 由信标节点单元产生。

对于 70 kHz 低频电磁波可以忽略麦克斯韦电磁学方程中的时间因素, 低频电磁波电磁场分布退化为静磁场分布。同时所研究的系统选用有限长度的致密螺线管作为标记磁波的发射器, 可以等效为磁偶极子天线<sup>[12]</sup>。因此在螺线管垂直平面并且其中央所处于的水面上, 磁感应强度  $B$  可表示为<sup>[13]</sup>

$$B = -nIR^2\mu_0 l / [2(d^2 + l^2)^{3/2}] \quad (1)$$

式中:  $n$  为线圈单位长度匝数;  $I$  为螺线管内电流;  $R$  为螺线管半径;  $\mu_0$  为真空中磁导率;  $l$  为  $1/2$  的螺线管长度;  $d$  为平面上一点距螺线管的水平距离, 即信标节点单元和测量传感器之间的距离。

当  $d \gg l$  时,  $d^2 + l^2 \approx d^2$ , 且当器件参数确定以后, 从式 (1) 可得  $B \propto d^{-3}$ , 通过传感器可以测量磁感应强度  $B$  的值, 从而计算出  $d$ 。

对磁感应强度的测量, 最终得到的是测量传感器的输出电压值。在模拟井下硐室环境中, 实际检测得到信标节点单元与测量传感器在不同距离时的数据, 经由 Matlab 软件对数据进行拟合, 可以得出接收磁场强度和距离之间的关系, 见式 (2), 其符合式 (1) 体现的规律。

$$U = K_u d^{-3} + U_0 \quad (2)$$

其中:  $U$  为检测传感器的输出电压信号幅值;  $K_u$  为比例系数;  $U_0$  为无穷远时检测到的电压信号。需要指出, 在不同的模拟环境中  $U_0$  和  $K_u$  的值不同, 但可通过在特定环境中的数据标定得到。

### 2.2 三边定位计算

要确定 1 个活动点与 1 个固定点的距离有许多方法, 三边定位方法是比较常用的一种。确定掘进机周边人员位置的三边定位原理如图 3 所示, 在掘进机机体的四角各布置一个信标发生区域  $a、b、c、d$ , 处于  $Q$  点的工作人员随身携带的 PAD 可分别测出  $Q$  点至  $a、b、c、d$  四点的距离, 取其中 3 个距离进行计算, 设  $Q$  点至  $a、b、c$  三点的距离分别为  $d_a、d_b、d_c$ 。

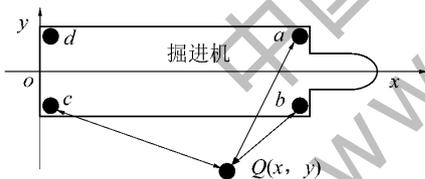


图 3 三边定位原理

已知  $a、b、c$  三点的坐标分别为  $(x_a, y_a)、(x_b, y_b)、(x_c, y_c)$ , 设  $Q$  点坐标为  $(x, y)$ , 运用三边定位数学模型计算公式:

$$\begin{cases} d_a = \sqrt{(x - x_a)^2 + (y - y_a)^2} \\ d_b = \sqrt{(x - x_b)^2 + (y - y_b)^2} \\ d_c = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} \end{cases}$$

即可得出  $Q$  点的位置坐标  $(x, y)$  为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(x_a - x_c) & 2(y_a - y_c) \\ 2(x_b - x_c) & 2(y_b - y_c) \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} x_a^2 - x_c^2 + y_a^2 - y_c^2 + d_c^2 - d_a^2 \\ x_b^2 - x_c^2 + y_b^2 - y_c^2 + d_c^2 - d_b^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由此得到  $Q$  点的具体坐标, 并可判断人员是否

在危险区域。

## 3 报警系统设计

根据上述定位原理分析, 要求危险区域报警系统能测定工作人员与不同信标节点之间的距离, 并定位工作人员的位置。当工作人员处于危险区域时, 随机发出声光报警, 必要时对掘进机进行停机处理。

### 3.1 报警系统结构

掘进机危险区域报警系统结构如图 4 所示, 主要包括  $N$  个移动监测装置 PAD 和集中式数据处理装置 2 个部分。集中式数据处理系统有包括 MCU 控制器、4 个信标节点、通信模块、报警与显示模块以及供电模块。PAD 包括控制器、检测模块、报警与显示模块和通信模块。PAD 和集中式数据处理装置的主要控制模块均采用 STM32F103 嵌入式 ARM 作为控制核心, 主要实现对信标节点、报警与显示模块的触发控制, 以及 MCU 控制器和 PAD 控制器双方之间通信。信标节点能产生并发送 70 kHz 电磁波信号, 该信号由 PAD 中的检测模块进行电磁波强度检测。通信模块采用 2.4 GHz 频段数字通信, 用于集中式数据处理装置和 PAD 之间的信息交换。报警与显示模块用于人员在危险区域时的报警与显示。

### 3.2 报警系统工作流程

报警系统工作流程分集中式数据处理装置工作流程和 PAD 工作流程 2 个部分, 两者密切配合完成危险接近的监测功能。

系统工作过程可分为以下 4 个步骤: ①发送电磁波标记信号。集中式数据处理装置的 MCU 控制器(以下称主控制器)首先控制 4 个信标节点发出特定频率的电磁波标记信号, 采用分时依次循环发送信号的原则进行, 以此来避免各信标节点之间的相互干扰。②发送同步信号。主控制器在每次发送电磁波标记信号的同时, 通过通信模块向各个 PAD 发送同步信号, 告知 PAD 此时信标节点的编号;

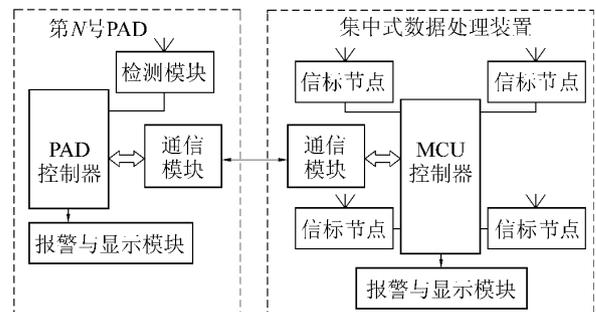


图 4 掘进机危险区域报警系统结构

PAD 每接收到一次同步信号后,开始检测当时的电磁波强度,并记录下来,由此获得 PAD 距离某个信标节点之间的距离。在获得多于 3 个信标节点与 PAD 之间的距离时,PAD 控制器利用三边定位算法得出该 PAD 的坐标,判断其是否处于危险区域,判断后显示结果,若 PAD 处于危险区域则启动报警模块。③数据回传。在每次发送同步信号后,主控制器发送某个 PAD 编号进行联络呼叫,编号从 1 号开始,每次递增 1,直至最后一个 PAD 的编号,然后再从 1 开始。PAD 在接收到主控制器的呼叫后,自身编号和呼叫号相同的 PAD,则将自身的最新监测结果回传给主控制器。④主控制器响应。根据 PAD 回传的结果,主控制器作出报警、停机响应。集中式数据处理装置工作流程如图 5 所示,PAD 工作流程如图 6 所示。

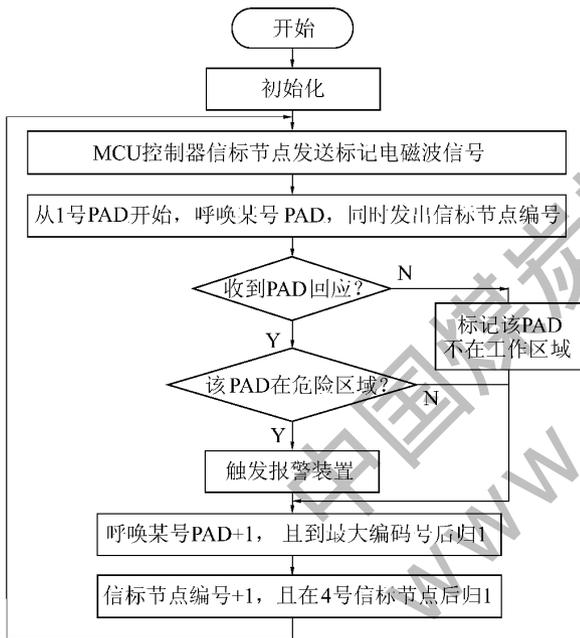


图 5 集中式数据处理装置流程

#### 4 PAD 与信标节点距离实测试验

危险区域判断结果的正确程度,主要决定于由电磁波感应强度来计算的 PAD 与各信标节点的距离是否准确。系统在模拟井下环境条件下进行 PAD 与信标节点间的距离实测,在得到测量传感器的信号后,经过式(2)计算得到测量距离值。实际距离在 50 ~ 450 cm 内的接收信号测量值与实际值的对比如图 7 所示,表 1 给出了测量值与实际值的相对误差,可知最大误差 12.37%,最小误差 0.09%,平均误差 4.3%,基本满足系统测距与定位功能需要。

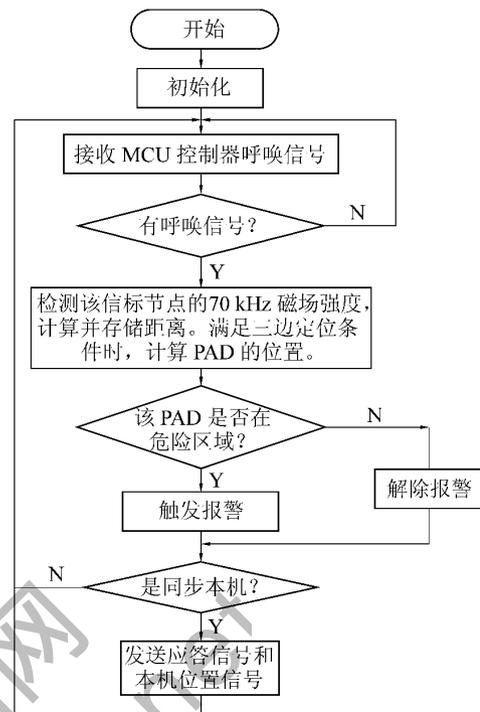


图 6 PAD 工作流程

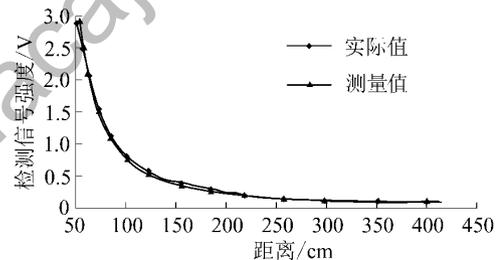


图 7 接收信号的测量值与实际值  
当检测距离小于 50 cm 时,由于此时式(1)中  $d \gg l$  (检测距离远大于螺线管长度) 的条件不再成立,测距误差较大。此时可建立磁感应强度和实际距离的对照表,通过查表的方法得到实际距离值。

表 1 测距误差分析

实际距/离/cm	计算距/离/cm	误差/%	实际距/离/cm	计算距/离/cm	误差/%	实际距/离/cm	计算距/离/cm	误差/%
50	54.27	8.54	105	102.00	2.85	180	163.36	9.24
55	57.44	4.45	110	105.48	4.11	190	166.49	12.37
60	59.86	0.24	115	108.96	5.24	200	193.08	3.46
65	63.60	2.16	120	111.95	6.70	210	193.08	8.06
70	67.87	3.04	125	116.21	7.03	220	225.93	2.70
75	73.47	2.04	130	125.43	3.51	240	240.22	0.09
80	78.53	1.83	135	131.56	2.55	260	253.01	2.69
85	84.40	0.70	140	134.68	3.80	280	283.02	1.08
90	90.38	0.42	150	139.86	6.76	300	325.95	8.65
95	93.58	1.49	160	142.37	11.02	350	366.13	4.61
100	98.86	1.13	170	157.10	7.59	400	412.99	3.25

## 5 结 语

以 EBZ-260 型掘进机为对象进行危险区域报警系统研究和设计,在构建危险区域坐标模型的基础上,提出了包括低频电磁波强度检测、分时依次循环发射、三边定位计算等技术在内的人员进入危险区域检测方法,并以 ARM 嵌入式控制器为核心,搭建了实际系统。经模拟巷道环境测试,验证了所提方法的可行性和正确性。后续可进一步采用在不同环境中实时标定等方法,实时修正电磁波强度和距离之间的计算公式,以得到更高的定位精度。该报警系统实现了在掘进机工作现场,近距离范围内工作人员的实时检测与定位、危险区域判断、报警与停机功能,提升了生产作业过程中工作人员和设备的安全性,保障了生产安全,具有良好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 王 虹. 我国煤矿巷道掘进技术和装备的现状与发展[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(1): 57-62.
- [2] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011.
- [3] 佚名. 煤矿掘进机司机操作规程(2010 汇编)[EB/OL]. [2014-04-24]. <http://www.mkaq.cn/jishu/czge/2010/1127/65070.html>.

(上接第 114 页)

### 参考文献:

- [1] 罗海珠, 钱国胤. 各煤种自然发火标志气体指标研究[J]. 煤矿安全, 1992, 23(5): 5-10.
- [2] 邓 军, 徐精彩, 徐通模, 等. 煤自燃性参数的测试与应用[J]. 燃料化学学报, 2001(6): 553-556.
- [3] 邓 军, 徐精彩, 阮国强, 等. 国内外煤炭自然发火预测预报技术综述[J]. 西安矿业学院学报, 1999, 19(4): 293-297.
- [4] 王永湘. 利用指标气体预测预报煤矿自燃火灾[J]. 煤矿安全, 2001, 32(6): 15-58.
- [5] 肖 旻, 王振平, 马 砾, 等. 煤自燃指标气体与特征温度的对应关系研究[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(6): 47-51.
- [6] 徐精彩. 煤自燃危险区域判定理论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
- [7] 刘艳红, 姚 建. 煤样标志性气体选择的实验研究[J]. 煤矿开采, 2009, 14(4): 93-95.

- [4] David Chirdon. MSHA Proximity Detection [EB/OL]. [2014-04-24]. <http://www.msha.gov/>.
- [5] Anon. Strata Safety Products LLC [EB/OL]. [2014-04-24]. <http://www.strataworldwide.com/europe/index.php>.
- [6] 美国矩阵(MATRIX)公司. Engineering Safety Advancing Automation [EB/OL]. [2014-04-24]. <http://www.matrixteam.com/index.php>.
- [7] 南非 Booyco 电子公司. Providing Innovative Mine Safety Related Products Which Will Both Add Value and Increase Productivity Within the Southern African Mining Sector [EB/OL]. [2014-04-24]. <http://www.booyco-electronics.co.za/>.
- [8] 张 纯, 杨立君, 徐新宇. S100 掘进机安全预警系统研制[J]. 煤炭技术, 1999, 18(2): 1-5.
- [9] 谢处方, 烧克勤. 电磁场与电磁波[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 70-75.
- [10] 程守洙, 江之永. 普通物理学(下册)[M]. 6 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 83-86.
- [11] Denis Kent, Bill Schiffbauer. Proximity Detection Systems in Underground Mines [EB/OL]. [2014-04-05]. [http://www.qrc.org.au/conference/\\_dbase\\_upl/kent%20%20Proximity%20Detection.pdf](http://www.qrc.org.au/conference/_dbase_upl/kent%20%20Proximity%20Detection.pdf).
- [12] 贾妍妍. 基于超长波的管内移动机器人示踪定位系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 15-28.
- [13] 潘 涛, 李艳东. 煤矿巷道中粉尘对电磁波传播特性的影响[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(7): 97-99.

- [8] 李 曼, 李增华, 杨永良, 等. 运用多指标气体体系分析煤层自燃氧化性[J]. 煤矿安全, 2012, 43(1): 19-22.
- [9] 杨永斌, 王德明, 时国庆, 等. 典型气体指标在矿井火灾状态分析中的应用[J]. 煤炭工程, 2010(4): 70-72.
- [10] 肖 旻, 李树刚, 李 明, 等. 煤自燃预测预报技术研究进展[J]. 陕西煤炭, 2010(6): 4-7.
- [12] 杨宏民, 罗海珠. 利用气味检测法预测预报煤矿火灾[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(12): 6-9.
- [12] 梁运涛. 煤炭自然发火预测预报的气体指标法[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(6): 5-8.
- [13] 杨永斌, 王德明, 时国庆, 等. 典型气体指标在矿井火灾状态分析中的应用[J]. 煤炭工程, 2010(4): 70-72.
- [14] 陈汝豪, 王德明, 曹 凯. 煤炭低温氧化自燃过程指标气体影响因素关联分析[J]. 矿业工程研究, 2012, 27(1): 32-38.
- [15] 胡新成, 杨胜强, 周秀红. 煤层自然发火指标气体研究[J]. 煤炭技术, 2012, 31(5): 94-96.