

机电与自动化

矿井无线多媒体传感器网络 UWB 信号收发策略研究

张国鹏¹, 王艳芬², 丁恩杰¹

(1. 中国矿业大学 物联网研究中心 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 信息与电气工程学院 江苏 徐州 221116)

摘要: 为提高无线多媒体传感器网络(WMSN) 在煤矿井下的误码率特性, 并实现高效的时域超宽带(UWB) 信号收发策略。根据相邻节点间是否存在可视链路以及巷道多径的密集程度, 对 UWB 井巷传播环境进行综合信道建模和参数化区分; 以抗井巷多径传播为目标, 提出无码间干扰的 UWB 信号发射策略。研究结果表明: 所提出的 UWB 信号收发策略能有效利用矿井巷道多径传播特性, 在不同的井巷环境中满足 WMSN 对软、硬件实现低复杂度和低误码率性能的需求。

关键词: 无线多媒体传感器网络; 误码率; 收发策略; 矿井通信; UWB

中图分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2013)12-0071-05

Study on UWB Signal Transmitting and Receiving Strategy of Mine Wireless Multi-Media Sensor Network

ZHANG Guo-peng¹, WANG Yan-fen², DING En-jie¹

(1. Research Center of Internet of Things, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

2. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to improve bit error rate features of wireless multi-media sensor network in underground coal mine and to realize high efficient transmitting and receiving strategy of the UWB signals, according to a visual link circuit existed or not in the adjacent nodes and the multipath intensive degree of gateway, a comprehensive signal channel modeling and the parameter distinguishment was conducted on the UWB transmission environment in underground mine. Taking resist the mine multipath transmission as a target, a UWB signal transmission strategy with non intersymbol interferences was provided. The study results showed that the UWB signal transmission and receiving strategy provided could effectively utilize the features of multipath transmission in mine roadway and could meet the requirements of software and hardware by WMSN to realize complicated and low bit error rate performances in different mine roadway environment.

Key words: wireless multi-media sensor network; bit error rate; transmitting and receiving strategy; mine communication; UWB

0 引言

无线多媒体传感器网络(WMSN) 具有部署扩展简便, 支持移动性、自组织性, 以及灾后可自愈性等优势。在煤矿安全生产、救援监测方面与工业以太网和现场总线网络形成互补^[1]。除湿度、温度、瓦斯浓度等信息外, WMSN 还要监测传输 IP 语音、图像、视频流等高速多媒体数据信息。考虑到煤矿井巷恶劣的无线通信环境, WMSN 的实施仍面临很多难题。在 WMSN 物理层方面, 文献 [2] 研究了 MB

-OFDM-UWB 调制策略, 在给定误码率和发射功率的前提下, 测算了井下单跳无线链路的最大传输距离; 文献 [3] 在分析煤矿井巷对无线电磁波传播衰减特性的基础上, 研究了 CDMA 和 OFDM 调制策略的误码率性能。文献 [4] 研究了 WMSN 在煤矿井巷的组网策略和拓扑控制等网络层问题。煤矿井巷特殊的管状结构是引发电磁波复杂反射、折射和散射, 并在接收端形成多条路径(多径)信号叠加的主要原因^[5]。多径传播引起连续通信系统(如 CDMA 和 OFDM 系统^[2])遭受严重的码间串扰并致使

收稿日期: 2013-06-22; 责任编辑: 赵瑞

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2012141); 国家留学基金公派博士后研究资助项目(2900759643); 中国博士后科学基金资助项目(20100481185); 江苏省博士后科学基金资助项目(1101108C); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010QNA27)

作者简介: 张国鹏(1978—), 男, 江苏徐州人, 副研究员, 博士。Tel: 0516-83899704; E-mail: gpzhang@cumt.edu.cn

引用格式: 张国鹏, 王艳芬, 丁恩杰. 矿井无线多媒体传感器网络 UWB 信号收发策略研究 [J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(12): 71-75.

其误码率性能低下。而时域超宽带(UWB)无线传输技术则可以有效利用矿井巷道的多径传播特性,获得低误码率^[6]。与MB-OFDM-UWB调制策略相比,UWB无需载波调制,并具有低功耗、低复杂度及高精度定位等优势^[7]。因此,UWB对在煤矿井下实现低成本、低能耗、长工作周期的WMSN具有更多优势。尽管文献[8]对UWB的井巷传播特性进行了研究,但未分析其误码率性能以及抗多径最优信号调制发射和接收策略。笔者在文献[8]的研究基础上,分析UWB在不同矿井环境中的多径传播和误码性能特性,提出高效、实用的UWB信号调制发射和接收策略,为进一步研究基于UWB矿井WMSN链路层和网络层协议提供参考。

1 UWB井巷衰减与多径传播特性

煤矿井巷为窄空间、长距离、多弯道管状结构,WMSN采用多跳组网方式^[4](图1),单跳无线链路的通信质量成为制约WMSN多跳传输性能(数据速率和传输时延等)的关键,发射和接收天线间是否存在可视(LoS)链路会对单跳链路的通信质量产生重要影响。LoS不仅要求在收/发天线间的连线上无物体障碍,还要求该连线第一Fresnel区的横截面不能被障碍物遮蔽^[9],否则,收/发天线间只存在非可视(NLoS)链路。煤矿井巷的NLoS环境和多径传播特性是导致井下无线通信高误码率的主要因素。

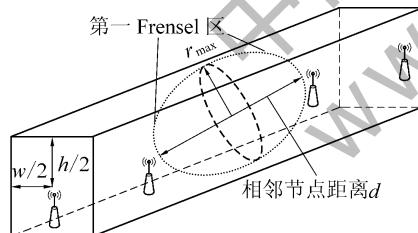


图1 基于多跳链路通信的井下WMSN拓扑结构

1.1 UWB井巷传播综合衰减模型

在煤矿井巷环境下,假设无线传感器节点工作于单天线、半双工状态,则相邻节点(即一组发射天线和接收天线)之间存在LoS链路的最大距离限 d_L 的推导过程如下:假设巷道的横截面为矩形,宽度为 w ,高度为 h ,且无障碍物存在,与收/发天线间连线垂直的任意平面将和第一Fresnel区相交构成一个圆截面,如图1所示。当该平面位于连线中心时,圆截面半径取得最大值 r_{\max} ,设相邻节点(即发射天线和接收天线)间距离为 d ,电磁波的波长为 κ ,根据

Fresnel定理可知^[9]

$$r_{\max} = \sqrt{\kappa d} / 2 \quad (1)$$

当 $w \geq h$ 时,为使第一Fresnel区不被巷道所遮蔽,应有 $r_{\max} \leq h/2$,将其代入式(1)可得

$$d \leq h^2 / \kappa \quad (2)$$

式(2)表明,当 $w \geq h$ 时, $d_L = h^2 / \kappa$ 。同理,当 $h \geq w$ 时, $d_L = w^2 / \kappa$ 。为确保井下无线多媒体数据业务的高速率、低时延传输,在综采工作面和抢险救援现场等特殊工作区域应短距离、高密度部署传感器节点 d 应满足 $d \leq d_L$ 。而在采空区、主巷道等监测频率较低的区域则可以采用低密度、较长距离的节点部署策略 d 可适当大于 d_L 。根据以上分析,可将煤矿井巷无线通信环境归结为以下4类信道类型。

1)巷道I。近距离多径LoS:在无综采人员、设备存在的采空区和大巷的直巷道部分,只要相邻节点的部署距离满足 $d \leq d_L$,则存在LoS链路。

2)巷道II。近距离多径NLoS:在大巷、采空区的弯曲巷道部分,在人员、机车往来频繁的直巷道,尽管相邻节点的部署距离满足 $d \leq d_L$,但其第一Fresnel区会被上述障碍物穿透,导致该区域相邻节点间只存在NLoS链路。

3)巷道III。远距离多径NLoS:在无综采人员、设备存在的采空区和大巷等区域,相邻节点的部署距离 $d > d_L$,因此,只存在NLoS链路。

4)巷道IV。短距离密集多径NLoS:在综采工作面、抢险救援现场等特殊区域,通常要求短距离、高密度部署传感器节点,以实现高精度的安全生产监控。然而,这类区域通常存在长臂采掘机、救援机械等大型金属装备,尽管相邻节点的部署距离满足 $d \leq d_L$,但由于第一Fresnel区会被上述障碍物穿透,因此,只存在NLoS链路。另外,大体积金属设备表面会对无线电磁波产生强反射和散射效应^[10],从而引起无线电信号的密集多径传播。

1.2 UWB井巷多径传播信道模型

使用S-V信道参数化区分方法^[11]对上述4类矿井巷道的多径传播过程进行建模。UWB脉冲经巷道传播后形成的多径在时间域以“簇”的方式到达接收天线,每个簇中的多径经历不同统计特征的幅度衰落和传播时延。矿井巷道对UWB脉冲的冲击响应信道模型可以表示为^[11]

$$h(t) = \sqrt{G} \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{K(l)} \alpha_{l,k} \delta(t - T_l - \tau_{l,k}) \quad (3)$$

其中: G 为巷道对多径的平均功率衰落; L 为簇数; $K(l)$ 为第 l ($1 \leq l \leq L$) 簇内的多径数目; $\alpha_{l,k}$ 为第 l 簇中第 k 个多径的信道冲击响应系数; $\delta(\cdot)$ 为脉冲函数; t 为系统时间变量; T_l 为第 l 簇到达时间; $\tau_{l,k}$ 为第 l 簇内第 k 个多径的到达时间, 且 T_l 和 $\tau_{l,k}$ 分别为速率为 Λ 和 λ 的泊松过程。根据文献 [5-6, 8, 10-12] 提供的矿井巷道、相关室内以及工业环境的实测数据, 上述 4 类煤矿巷环境中的 UWB 多径脉冲响应信道模型参数设置见表 1。

表 1 各类井巷多径传播信道模型参数设置

巷道类型	I	II	III	IV
Λ/ns^{-1}	0.02	0.40	0.07	0.07
λ/ns^{-1}	2.5	0.5	2.1	2.1
Γ	7.1	5.5	14.0	24.0
γ	4.3	6.7	7.9	12.0

注: Γ 和 γ 分别为簇和簇内多径的功率衰减系数。

式(3) G 与 d 有关, 可以表示为

$$G(d) = G_0 + 10n \lg(d/d_0) + S(d) \quad (4)$$

其中: G_0 为 d_0 处的传播距离损耗; n 为损耗指数; d_0 为天线远场参考距离, 通常取 $d_0 = 1 \text{ m}$; $S(d)$ 为信号功率的随机阴影衰落, 服从均值为 0、方差为 σ_s^2 的高斯对数正态分布。文献 [6] 在实际井巷环境中测得: 在 LoS 井巷环境中, $n = 1.47$, $G_0 = 4.5 \times$

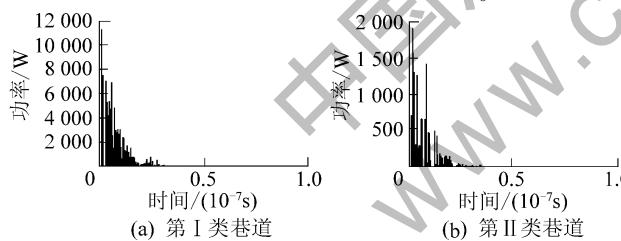


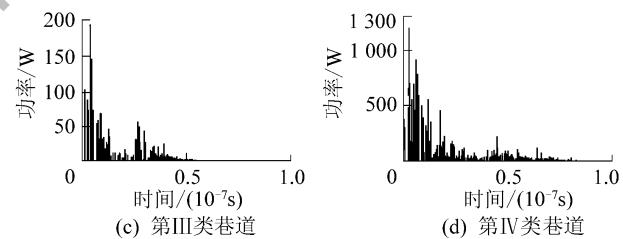
图 2 各类巷道信道模型的信号接收功率延迟特性

从图 2 可见, 上述 4 类巷道环境对 UWB 脉冲信号的时域展宽程度依次增加。为进一步说明不同井巷环境对 UWB 信号的时域展宽特性, 对 4 类井巷环境进行 100 次试验后测得的平均脉冲多径时延扩展分别为 28、40、60、80; 时延扩展的均方根分别为 5.2、8.2、14.3 和 23.8。由此可知, 上述 4 类巷道环境对 UWB 脉冲的平均时域展宽特性依次增强。此外, 时延扩展均方根是无线信道多径传播特性的标志参数^[6], 以上试验结果与文献 [6] 提供的实测数据基本一致: 在 LoS 情况下为 4~5 ns; 在 NLoS 情况下为 8~10 ns。这验证了所开发的 UWB 井下传播信道模型的准确性和有效性, 为继续设计高效的

10^{-3} $\sigma_s = 1.1 \text{ dB}$; 在 NLoS 井巷环境中 $n = 2.45$, $G_0 = 2.8 \times 10^{-3}$ $\sigma_s = 2.94 \text{ dB}$ 。

1.3 UWB 矿井多径衰落仿真试验

分析上述 4 类井巷信道对 UWB 信号的衰减与多径传播特性。试验巷道的宽度和高度均为 2.5 m; UWB 脉冲带宽 500 MHz。由式(2) 得 $d_L = 5 \text{ m}$ 。相应地, 仿真第 I 类和第 II 类矿井巷道时, 设置相邻节点间距离 $d_1 = 3 \text{ m} < d_L$; 仿真第 III 类巷道时, 设置相邻节点间距离 $d_3 = 8 \text{ m} > d_L$; 仿真第 IV 类巷道时, 设置相邻节点间距离 $d_4 = 2 \text{ m} < d_1 < d_L$, 以凸显井下工作面和灾害救援区等重点监测区域的高密度传感器节点部署。各类巷道环境的 UWB 多径衰落试验结果如图 2 所示。在第 I 类巷道中, 到达接收天线第 1 个多径的功率最高, 说明该类巷道对 UWB 脉冲的传播具有 LoS 特性。而在第 II、III、IV 巷道中, 功率最高的多径分别出现在第 1 个多径到达后的 8、17、11 ns, 说明 NLoS 环境阻塞了发射和接收节点间的直射波。其中, 第 III 巷道的 NLoS 由于功率最高的直射波被人体、机车或弯曲巷道阻碍所致; 第 III 类巷道的 NLoS 由于较长的传输距离所致; 第 IV 类巷道中, 尽管相邻节点的传输距离很短, 但大体积金属综采或救援设备的强反射、散射导致 UWB 脉冲的密集多径传播和单脉冲信号较大的时域展宽。



UWB 信号发射机、接收机, 以及降低井下无线通信的误码率提供了参考依据。

2 矿井 UWB 信号调制发射策略

采用脉冲位置调制(PPM) UWB 调制方案^[13], 为形成所需要的超宽带信号以及支持 MAC 层多用户接入, PPM 需要用伪随机噪声对数据码元进行编码, 编码后的码元脉冲在时域上有所偏移, 即构成所谓的脉冲位置调制-跳时-超宽带(PPM-TH-UWB)信号。笔者仅研究单跳无线通信链路, 不考虑码元信息的多用户区分问题。

若系统采用 M 进制调制, 待发射的任意第 m 个

码元 $q_m \in \{0, 1, \dots, M-1\}$ 将携带 b 比特的信息, 且 $b = \log_2 M$ 。定义单位码元的传输时间长度为一个数据帧 T_f ; $p(t)$ 表示时间长度为 T_p 且能量归一化的码元调制脉冲(如二阶高斯波形等) $p(t)$ 携带码元信息。PPM 使用重复信道编码策略, 即: 将帧时长 T_f 进行 N_p 等分, 每一等分(时长为 T_d) 为一个码元脉冲发射的时间间隔; 在任意帧内, 相同的 $p(t)$ 被重复发送 N_p 次。因此, 系统发射的任意第 m 个码元的 UWB 时域脉冲序列 $s(t)$ 可以表示为

$$s(t) = \sum_{j=0}^{N_p-1} \sqrt{E_p} (t - mT_f - jT_d - \Delta q_m) \quad (5)$$

其中: E 为时间归一化单位脉冲能量; j 为码元脉冲数; Δ 为 M 进制 PPM 所需的脉冲单位时延。

尽管传感器节点发射的 $p(t)$ 的时长 T_p 为纳秒级, 但经巷道的多径传播, UWB 脉冲信号在接收节点仍然被时域展宽至 $50 \sim 100$ ns。因此, 在矿井巷道这种强多径传播环境中, 不能简单地认为多径到达接收节点后的重叠概率为 0。为避免出现多径时域重叠(即码间干扰)现象, UWB 单位码元发射策略应该设置时间帧长度 T_f 略大于信道的平均多径时延扩展。因此, 在第 I、II、III、IV 类巷道环境中 T_f 分别不小于 28、40、60、85 ns。

3 矿井 UWB 信号接收策略

当 $s(t)$ 的调制参数 T_f 满足上述无多径重叠条件时, 单位 UWB 脉冲经巷道多径衰落传播后在接收节点形成时域互不重叠的脉冲序列, 单位脉冲的总接收能量 E_p 将散布于这些多径。考虑到接收机受加性高斯白噪声信号 $n(t)$ 的干扰, 接收到的 UWB 脉冲多径衰落信号 $r(t)$ 可以表示为

$$r(t) = s(t) h(t) + n(t) = n(t) + \sqrt{E_p} \times \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{K(l)} a_{l,k} p(t - mT_f - jT_d - \tau_{l,k} - \Delta q_m) \quad (6)$$

若接收机能将式(6)的多径进行时域分离进而

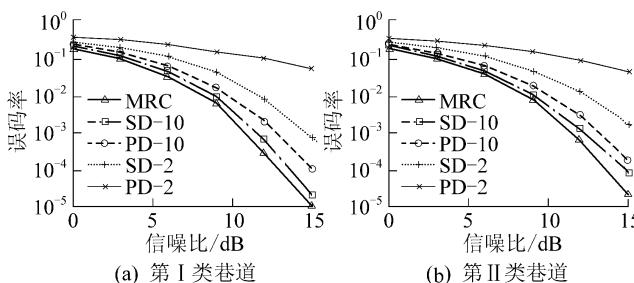
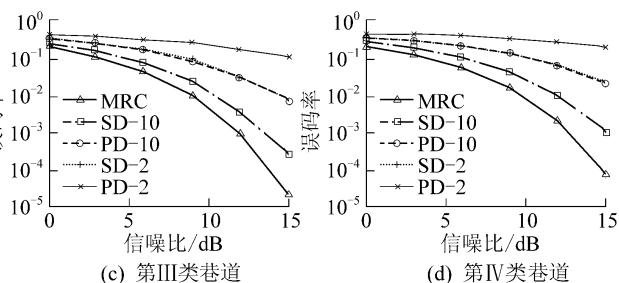


图 3 4 类巷道环境中接收机误码率性能仿真结果

合并其所携带的能量, 接收节点可利用合并后的总能量进行码元判决, 进而获取矿井巷道多径传播的时间分集增益、降低码元判决的误码率。这也就是 UWB 系统能够利用巷道多径传播特性获取低误码率性能的根本原因。接收机由相关器和合并器组成。相关器的每个分支对发射信号的 1 个多径进行匹配操作; 全部分支匹配后的结果再输出给合并器, 进行能量合并; 码元判决则使用极大似然比检测器。接收机的相关器需发射导频信号并通过反馈信道获取多径时延和多径幅度衰落等信道信息。而基于最大比合并(MRC) 算法的合并器必须获取单位脉冲每个多径的时间、幅度分布才能进行最后的码元判决。因此, 尽管 MRC 的误码率性能最佳, 但需昂贵的软、硬件成本并导致较长的码元判决时延。而选择性分集(SD) 合并算法只选择部分多径进行码元判决, 虽然 SD 算法会丢失大部分多径能量并导致其误码率性能低于 MRC, 但其软、硬件结构简单, 在大规模矿井 WMSN 通信中具有相对的实用性。

对 PPM-TH-UWB 无线收发系统在上述 4 类巷道环境中的误码率性能及接收策略进行分析。在第 1.3 节试验基础上, 设置传感器节点式(5)的发射参数如下: 时间归一化单位脉冲能量(发射功率) $E_p = -30$ dBm, $T_p = 0.5$ ns, $\Delta = 0.5$ ns, $N_p = 1$ 。根据第 2 节中分析的最优调制策略, 设置 $T_f = 90$ ns, 使得 T_f 大于各类矿井信道的平均多径时延扩展, 从而有效避免出现多径时域重叠, 即码间干扰。对不同井巷环境接收机(采用不同多径合并策略)的误码率性能进行仿真, 试验结果如图 3 所示。

图 3 的信噪比, 即单位脉冲功率与信道高斯白噪声功率之比; SD- K 合并策略选择 K (合并的多径分量数量) 条幅度最大的多径进行合并; PD- K 合并策略选择最先到达接收节点的 K 条多径进行合并。MRC 利用了全部的多径能量进行合并, 其误码率曲线是其他合并策略的性能上限。为减小传感器



节点的能耗和软、硬件实现复杂度 K 值不宜太大, 这里取 $K=2$ 和 10 做比较。

根据图 3 可知, 在每类巷道环境中: ①MRC 获得最低误码率; ②对于相同合并策略 K 值越大则误码率越低, 说明增加接收机相关器分支数可降低传感器节点误码率; ③对于相同的 K 值, $SD-K$ 的误码率低于 $PD-K$, 因为 $SD-K$ 选择能量最高的 K 个多径进行合并, 而 $PD-K$ 仅简单地合并最先到达的 K 个多径。但是 $PD-K$ 无需进行最优多径选择, 比 $SD-K$ 具有更低的算法及硬件实施成本。从图 3 还可看出, 在第 I、II 类短距离多径巷道环境中, 无论是否存在 LoS, 只要给定待合并的多径分量数量 K , $SD-10$ 和 $PD-10$ 策略的误码率性能差异不是很大。这说明在第 I、II 类巷环境, 无论 LoS 是否存在, 能量最高的多径分量通常最先到达接收节点。因此, 较为简单的 $PD-10$ 策略就可满足低误码率要求, 无需使用较为复杂的 $SD-10$ 合并策略。同时说明在第 I、II 类巷道环境中只有增加 K 才能获得更低的误码率。而在第 III、IV 类密集多径 NLoS 环境中, 能量最高的多径到达接收节点时经历较长时延, 对于相同的 K , $SD-K$ 和 $PD-K$ 策略的误码率性能差异较大, 导致 $PD-10$ 与 $SD-2$ 误码率曲线基本重合。这说明在巷道密集多径传播环境中, 须采用较为复杂的 $SD-K$ 合并策略才能满足低误码率要求。

4 结语

研究了基于 UWB 的井下 WMSN 物理层, 根据 LoS 存在与否, 以及多径传播的密集程度, 对矿井巷道环境进行了参数化区分与建模。在此基础上, 研究 PPM-TH-UWB 调制方案在不同巷道环境中的多径衰减状况和误码率性能, 提出了针对低复杂性和低误码率的井下 UWB 信号接收策略, 为进一步研究基于 UWB 的井下 WMSN 的数据链路层和网络层提供参考。

参考文献:

- [1] 孙彦景, 钱建生, 李世银, 等. 煤矿物联网系统理论与关键技术 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(2): 69-79.
- [2] 范新越, 杨维. 井下多媒体无线传感器网络自适应调制研究 [J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1291-1296.
- [3] 张玉, 杨维. 矿井巷道综合衰减模型与无线传输误码率性能综合比较 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(9): 1581-1586.
- [4] 周公博, 朱真才, 陈光柱, 等. 矿井巷道无线传感器网络分层拓扑控制策略 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 333-337.
- [5] 王艳芬, 于洪珍, 张传祥. 矿井超宽带复合衰落信道建模及仿真 [J]. 电波科学学报, 2010, 25(4): 805-812.
- [6] Chehri A, Fortier P R, Tardif P M. Large-Scale Fading and Time Dispersion Parameters of UWB Channel in Underground Mines [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2008(1): 1-10.
- [7] Chehri A, Fortier P. UWB-Based Sensor Networks for Localization in Mining Environments [J]. Ad-Hoc Networks, 2008(5): 179-188.
- [8] 刘鹏, 张国鹏, 杨小冬, 等. 基于 UWB 的井下无线传感网信道模型研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(6): 139-143.
- [9] Rappaport T S. Wireless Communications Principles and Practices [M]. 2th ed. Beijing: Electronics Industry Press, 2004.
- [10] Chehri A, Fortier P, Tardif P M. An Investigation of UWB-Based Wireless Networks in Industrial Automation [J]. International Journal of Computer Science and Network Security, 2008(2): 128-136.
- [11] Molisch A F. Ultra-Wide-Band Propagation Channels [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(2): 353-371.
- [12] 衡芹, 李世银, 张国旺, 等. 矿井巷道 MB-OFDM 超宽带无线信道建模及仿真 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1): 83-86.
- [13] ZHUANG Wei-hua, SHEN Xue-min, BI Qi. Ultra-Wideband Wireless Communications [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2003(6): 663-685.

(上接第 70 页)

- [4] 王红岩, 李景明. 煤层气基础理论、聚集规律及开采技术方法进展 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(6): 14-16.
- [5] 杨秀春, 李明宅. 煤层气抽采动态参数及相互关系 [J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(2): 19-23.
- [6] 卢长生. 煤层气产出量的影响因素 [J]. 中国煤层气, 2007, 4(3): 11-14.
- [7] Clarkson C R, Bustin R M. The Effect of Pore Structure and Gas Pressure Upon the Transport Properties of Coal: a Laboratory and Modeling Study [J]. Adsorption Rate Modeling Fuel, 1999, 78(11): 1345-1362.
- [8] Sunil Ramaswamy. Selection of Best Drilling, Completion and Stimulation Methods for Coalbed Methane Reservoirs [D]. Houston: Texas A & M University, 2007: 31-48.
- [9] 杨焦生, 李安启. 樊庄区块煤层气井开发动态分析及分类评价 [J]. 天然气工业, 2008, 28(3): 96-98.
- [10] 程百利. 煤层气井抽采工艺研究 [J]. 江汉石油学院学报, 2010, 32(6): 480-484.
- [11] 郝艳丽, 姚慧智, 瞿定祥. 抽采曲线在煤层气井评价中的应用 [J]. 断块油田, 2001, 18(2): 39-40.
- [12] 杨振威, 曾凡芝, 熊小波. 捞砂泵作业工艺技术 [J]. 油气井测试, 2005, 14(1): 47-48.
- [13] 孙永壮, 杜丙国, 邵宣涛. 机械捞砂工艺研究 [J]. 石油学报, 2006, 27(6): 125-127.