

# 基于 CS 架构的煤矿井下图像处理算法研究

赵小虎<sup>1,2</sup>, 刘闪闪<sup>1,2</sup>, 沈雪茹<sup>1,2</sup>, 有 鹏<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221008;

3. 中国矿业大学 徐海学院, 江苏 徐州 221008)

**摘 要:**针对煤矿井下无线传感网络因信息传输量大而导致传感节点能量消耗快、设备寿命缩减的问题,在分析煤矿井下图像特点和小波变换系数层特点的基础上,提出一种基于小波变换的压缩感知稀疏图像处理算法,即分块稀疏算法。采用 bior4.4 小波变换对煤矿井下图像信号进行分块稀疏变换,通过测量矩阵对稀疏化的图像数据进行测量,得到测量数据,再利用 ROMP 算法对稀疏变换的图像进行重构。仿真试验结果表明,与传统的压缩感知算法相比,该算法不仅能够以更低的采样率获得高质量的重构图像效果,压缩了图像大小,且能够快速还原图像。

**关键词:**图像处理;压缩感知;煤矿井下;无线传感网络

中图分类号:TD67 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2018)02-0219-06

## Research on processing algorithm of image in underground coal mine based on CS framework

ZHAO Xiaohu<sup>1,2</sup>, LIU Shanshan<sup>1,2</sup>, SHEN Xueru<sup>1,2</sup>, YOU Peng<sup>3</sup>

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

2. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

3. Xuhai College, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** According to a quick energy consumption of the sensor nodes caused by the high information transmission, the reduced equipment service life and other problems of the wireless sensor network in the underground coal mine, based on the analysis on image features and wavelet transform coefficient layer features of the underground coal mine, a processing algorithm of the compressed perception and sparse images was provided based on the wavelet transform that was blocking sparse algorithm. A bior4.4 wavelet transform was applied to the blocking sparse transform on the images and signals in the underground coal mine. The measurement matrix was applied to the measurement of the spares image data, the measured data were obtained and then the ROMP algorithm was applied to the restructure of the spares transform images. The simulation experiment results showed that in comparison with the traditional compressed perception algorithm, the processing algorithm could not only obtain the high quality restructured image effect with a lower sampling rate, but could compress the image size and could rapidly restore the images.

**Key words:** image processing; compressed perception; underground coal mine; wireless sensor network

## 0 引 言

我国的煤炭开采、生产、消费量在世界上的排名远超过其他国家,随着矿井开采深度及开采范围在逐年增加和扩大,开采难度加大,煤矿动力等灾害越来越严重。据统计,近 10 年来,我国在开采煤炭的

过程中百万吨死亡率是美国的 13.5 倍<sup>[1-2]</sup>。纵观国际采矿史矿难发生的致灾机理和地质情况不清、灾害威胁不明、重大技术难题没有解决等是导致事故的主要原因。袁亮院士<sup>[3]</sup>指出:要想从根本上破解煤矿安全高效生产难题,煤炭工业须由劳动密集型升级为技术密集型,创新发展成为具有高科技特

收稿日期:2017-10-22;责任编辑:赵 瑞 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.02.032

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804404)

作者简介:赵小虎(1976—),男,江苏徐州人,教授,博士生导师。E-mail:xiaohuzhao@126.com

引用格式:赵小虎,刘闪闪,沈雪茹,等.基于 CS 架构的煤矿井下图像处理算法研究[J].煤炭科学技术,2018,46(2):219-224.

ZHAO Xiaohu, LIU Shanshan, SHEN Xueru, et al. Research on processing algorithm of image in underground coal mine based on CS framework [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(2): 219-224.

点的新产业、新业态、新模式,走智能、少人(无人)、安全的开采之路。新世纪“互联网+”及智能化发展势头强劲,在总结煤炭开采历史及科技发展趋势的基础上,思考了煤炭开采如何应对新一轮的科技创新,针对我国煤炭开采面临的挑战和机遇,提出了煤炭精准开采的科学构想。煤炭精准开采是人类社会未来采矿的必由之路,以智能感知、智能控制、物联网、大数据云计算等作支撑,具有风险判识、监控预警等处置功能,能够实现时空上准确安全的智能少人(无人)安全精准开采的新模式新方法。而近几年提出的矿山物联网<sup>[4]</sup>是通信网和互联网的拓展应用和网络延伸,为煤炭的安全开采提供了技术手段。矿山物联网利用感知技术与智能装置采集矿山的人、物、环境信息,以构成泛在感知网络<sup>[5-6]</sup>。

随着物联网技术在煤矿生产中的应用,用于异构复杂传感器所采集的实时监控数据、语音视频图像信息以及人员与人员、人员与设备、设备与设备间的交互信息将呈现几何倍数的增长<sup>[7-8]</sup>,这些海量数据对煤矿现有的网络传输线路和设备、数据处理和存储设备都将形成巨大挑战。随着矿山物联网的不断发展,越来越多的问题凸显出来,在煤矿井下及地面上无线网络节点分布越来越多,尤其是井下,更加倾向于无人值守作业的智能操作<sup>[9-10]</sup>。提高煤炭生产的安全性及高效性是必然的趋势,各个节点采集和处理的数据量将呈几何式的增长,带来的一系列问题将使物联网资源严重消耗,生存周期缩短。

人员的安全问题和实时图像信息的传输、重构有待解决,传统的图像信息的采集与重构是基于Nyquist采样定理,这种方法想要获得较清晰的图像信息需要采集大量的数据进行处理,从而增加了整个传输系统的硬件要求,同时增加了图像信息的传输与处理的时间,进而增加了整个系统的功耗<sup>[11-12]</sup>。在井下现场采集到的图像本来就不清晰,想要以快速、较好的重构效果重构出原始的图像对于煤矿的安全和生产具有重要意义。

## 1 煤矿井下图像特点和小波变换分析

以往研究的分析方法,如傅里叶变换、小波变换都是侧重解开信号内部的秘密,但是探索方式不够理想,要想在其他平台或者其他坐标系中使研究人员能够更加简洁直观地分析信号,首先必须对井下图像的特征有所了解,井下图像具有以下4个方面的特点<sup>[13-14]</sup>。

1)煤矿井下的特殊环境决定图像采集地点相对固定,图像内容变化较小,图像内相邻像素间的空间以及图像与图像之间的时间相关性都很大,这些特点决定了在编写井下图像的压缩编码算法时可以采用比较高的压缩比率。

2)由于煤矿井下的光线微弱、照度很低,而煤炭又都是黑色物质,所以井下安装的摄像头几乎都是黑白摄像头,黑白摄像头具有实用、可靠、清晰等优点。因此,井下图像多是由黑、白构成的灰度信号,色调比较单一。

3)需要实现较长距离(10 km)的无中继传输。若采用中继器的话,一方面会降低系统的可靠性,另一方面增加了系统的危险性。因此必须采用有效的图像压缩方法使得图像信号在井下可以实现较长距离的无中继传输。

4)矿井监控系统是一个非对称的系统,解码端比编码端复杂。对于矿井监控系统来说,由于编码器和解码器所处的环境不同,因此就决定了编码和解码不是完全对称的。因为编码器在井下,需要越简单越好,而解码器在井上,为了恢复出更好的图像质量,可以采取比较复杂的手段。矿井监控系统是一个非对称系统,而且解码端比编码端复杂。

压缩感知的出现为其提供了新思路和新途径。Client/Server架构(CS架构),即服务器/客户端架构最重要的意义在于其可以大幅减小信号采集端的复杂度,在信号采集端采样率高的情况下,信号接收端也能够以较大的概率重构出原始信号。

小波是在一个局部区域内波动的函数,用一组时域函数来构成一组基函数,前提是这组时域函数是一组持续时间很短的函数,用这组基函数来实现对时域信号的分解,其主要优点是通过变换来突出表现信号某一方面的突出特性<sup>[15-17]</sup>。小波分析的思想是按照尺度分析来分析信号:将小波收缩和平移,然后研究信号和小波之间的相关性,小波变换可以在不同分辨率下逼近某一函数,实现多分辨率分解,获得很高的压缩比,而且小波变换具有优良的空频局部特性,能够多分辨率地描述图像<sup>[18]</sup>。另外人类的视觉生理试验表明,人眼在对黑白图像进行观察时,对黑白图像的灰度变化是很不敏感的,因此,可以适当降低井下黑白图像的亮度等级,从而减少数据量。人眼对水平和垂直方向的失真敏感,对方向的灵敏度低。小波变换将图像分解为水平、垂直及对角3个方向的子图,与人的视觉方向特性非常

吻合,这样就可以根据不同方向的信息对人眼作用的不同来分别设计量化器,从而得到很好的编码效果。基于以上分析,小波编码具有高压缩比及适应人眼视觉特性的优点,这些优点使得小波变换适合于井下图像的稀疏压缩。

## 2 图像处理改进型算法步骤及流程

### 2.1 小波分解

将图像进行 5 层小波分解,利用 Sobel 算子对图像进行边缘信息检测,计算每层子带的采样率。同时,结合图像块方向性和边缘性信息不同,自适应地对变换后的各层子带进行分块采样<sup>[19]</sup>;小波分解将图像分为低频部分(LL)和低频部分(HL, LH, HH)。经 bior4.4 小波变换后,图像高频部分具有不同的稀疏性:HL 在水平方向具有列稀疏性,LH 在垂直方向具有行稀疏性,HH 在对角方向具有稀疏性。因此,在对图像进行 5 层 bior4.4 小波变换后的高频子带系数部分,分别采取逐列、逐行及按对角方向处理;同时对各子带层以自适应速率采样,利用 ROMP 算法对测量后的高频部分进行自适应恢复,最后与低频部分 bior4.4 小波逆变换一起重构图像。图像一层小波分解如图 1 所示。

近似分量 LL	水平细节 HL
垂直细节 LH	对角细节 HH

图 1 图像一层小波分解

Fig. 1 Image's one layer wavelet decomposition

### 2.2 改进型算法步骤

图像处理改进型具体算法步骤如下:

1) 对分解层数  $N \times N$  的图像进行一层小波分解,得到 4 个小波子带系数  $\{HH_1, HL_1, LH_1, LL_1\}$ ,各子带系数大小记为  $N_1 \times N_1$ 。

2) 对  $N_1 \times N_1$  的子带系数  $LL_1$  继续进行小波分解,得小波子带系数  $\{HH_2, HL_2, LH_2, LL_2\}$ ,各子带系数大小记为  $N_2 \times N_2$ 。

3) 对  $N_2 \times N_2$  子带系数  $LL_2$  进行小波分解,得小波子带系数  $\{HH_3, HL_3, LH_3, LL_3\}$ ,各子带系数大小记为  $N_3 \times N_3$ 。

4) 对  $N_3 \times N_3$  子带系数  $LL_3$  继续进行小波分解,得小波子带系数  $\{HH_4, HL_4, LH_4, LL_4\}$ ,各子带系数大小记为  $N_4 \times N_4$ 。

5) 对  $N_4 \times N_4$  子带系数  $LL_4$  继续进行小波分解,得小波子带系数  $\{HH_5, HL_5, LH_5, LL_5\}$ ,各子带系数大小记为  $N_5 \times N_5$ 。

6) 根据采样率  $M/N'$  得到  $M$  的值,构造  $M \times N'$  大小的服从  $(0, 1/N')$  的高斯随机矩阵  $\Phi$ ,  $N'$  分别为  $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5$ ,高斯分布的测量矩阵  $\Phi$  仅对各高频子带系数  $\{HH_5, HL_5, LH_5; HH_4, HL_4, LH_4; HH_3, HL_3, LH_3; HH_2, HL_2, LH_2; HH_1, HL_1, LH_1\}$  进行自适应采样。通过测量得 5 个子带系数值矩阵  $\{HH'_5, HL'_5, LH'_5; HH'_4, HL'_4, LH'_4; HH'_3, HL'_3, LH'_3; HH'_2, HL'_2, LH'_2; HH'_1, HL'_1, LH'_1\}$ ,保持低频子带系数不变。

7) 利用 ROMP 算法分别对各子带系数  $\{HH'_5, HL'_5, LH'_5; HH'_4, HL'_4, LH'_4; HH'_3, HL'_3, LH'_3; HH'_2, HL'_2, LH'_2; HH'_1, HL'_1, LH'_1\}$  逐行、逐列及按对角方向进行重构,最后将其与低频子带  $LL_5$  一起进行小波逆变换得到恢复的图像。

8) 正交匹配追踪算法(OMP)每次迭代均只选择与残差最相关的一列,对 OMP 改进后的算法为正则化正交匹配追踪算法(Regularized Orthogonal Matching Pursuit, ROMP),算法是由 Deanna Needell 等提出,每次迭代选择与残差相关的多列,该算法可以通过任意满足 RIP 条件的感知矩阵恢复任意稀疏信号,提供了最优化方法的强力保证。算法描述如下:①输入:  $M \times N$  的传感矩阵  $\Theta$ ;  $N \times 1$  观测向量  $s$ ;信号的稀疏度  $K$ 。②输出:信号稀疏表示系数估计  $\hat{y}$ ;  $N \times 1$  维残差  $r_k = y - \Theta_k y_k$ 。

### 2.3 改进型算法流程

以下改进算法流程中:  $r_t$  为残差,  $t$  为迭代次数,  $\phi$  为空集,  $J_0$  为每次迭代找到的索引(列引号),  $\Lambda_t$  为  $t$  次迭代的索引(序列号)集合(注意:设元素数量为  $L$ ,一般有  $L \neq t$ ,因为每次迭代找到的索引  $J_0$  一般并非只含一个序列号),  $\pi_j$  为矩阵  $\Theta$  的第  $j$  列,  $\Theta_{\Lambda_t}$  为按索引  $\Lambda_t$  选出的矩阵  $\Theta$  的列组合,  $y_t$  为  $L \times 1$  的列向量,符号  $\cup$  表示集合并运算,  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  为求向量内积,  $abs[\cdot]$  为求模值(绝对值)。

1) 初始化  $r_0 = s$ ,  $\Lambda_0 = \phi$ ,  $\Theta_0 = \phi$ ,  $t=1$ 。

2) 计算  $u = abs[A^T r_{t-1}]$ ,即计算  $\langle r_{t-1}, \pi_j \rangle$ ,  $1 \leq j \leq N$ ,选择  $u$  中  $K$  个最大值或所有非零值(若非零坐标数量小于  $K$ ),将这些值对应  $\Theta$  的列序号  $j$  构成集合  $J$ (列序号集合)。

3) 正则化:在集合  $J$  中寻找子集  $J_0$ ,满足  $|u(i)| \leq 2|u(j)|$ ,  $i, j \in J_0$ ,选择所有满足要求的子

集  $J_0$  中具有最大能量 ( $\sum_j |u(j)|^2, j \in J_0$ ) 的  $J_0$ 。

$$4) \Lambda_t = \Lambda_{t-1} \cup J_0, \Theta_t = \Theta_{t-1} \cup \pi_j (j \in J_0)。$$

5) 求  $s = \Theta_t y_t$  的最小二乘解。

$$\hat{y}_t = \operatorname{argmin} \|s - \Theta_t y_t\| = (\Theta_t^T \Theta_t)^{-1} \Theta_t^T y_t。$$

$$6) \text{更新残差 } r_t = s - \Theta_t \hat{y}_t = s - \Theta_t (\Theta_t^T \Theta_t)^{-1} \Theta_t^T y_t。$$

$t = t + 1$ , 如果  $t \leq K$  则返回第 2 步, 如果  $t > K$  或  $\|\Lambda_t\| \geq 2K$  ( $\|\Lambda_t\|_0$  表示集合中的元素数量) 或残差  $r_t = 0$  则停止迭代进入第 7 步。

7) 重构所得  $\hat{y}$  在  $\Lambda_t$  所有非零项, 其值分别为最后一次迭代所得  $\hat{y}_t$ 。得到  $\hat{y}$  后, 利用稀疏矩阵可得重构信号  $\hat{x} = \Psi \hat{y}$ 。

### 3 改进算法仿真试验结果

煤矿井下数据采集和处理模拟工作如图 2 所示, 在终端节点通过检测设备采集检测区图像数据, 在主控制器中进行图像的小波稀疏及系数检测, 再通过无线传输, 在汇聚节点接收无线数据, 由上位机运行重构算法, 并将还原的图像数据显示出来<sup>[20]</sup>。

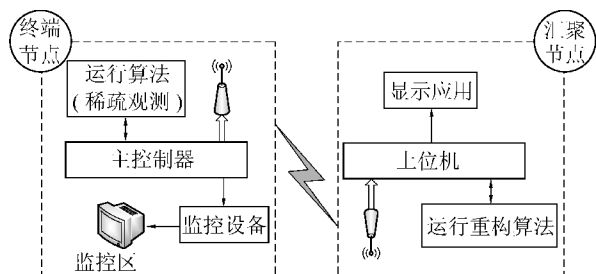
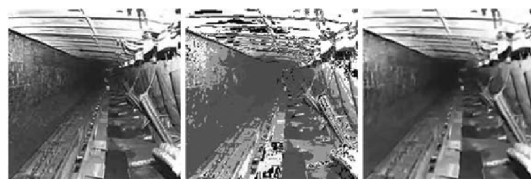


图 2 数据采集和处理模拟工作示意

Fig. 2 Simulation work of data acquisition and processing

根据第 2 节所述的改进算法, 并对比传统的 CS 算法, 对  $256 \times 256$  像素的煤矿井下综采工作面图像和煤矿井下工作通道图像分别进行试验, 选取小波函数 bior4.4 对图像进行 5 层小波分析, 得到  $N_1 = 128, N_2 = 64, N_3 = 32, N_4 = 16, N_5 = 8$ 。利用  $M \times N'$  大小的服从  $(0, 1/N')$  的高斯随机矩阵  $\Phi$ , 分别取总采样率  $f$  为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 Hz 进行试验, 为方便起见, 采用的测量矩阵为高斯随机分布矩阵, 在仿真试验时, 为了逼近理想中的图像重构效果, 均运行多次取均值作为最终的结果。图 3a 为在采样率为 0.2 Hz 时采集到的煤矿井下综采工作面图像, 图 3b 为通过 CS 传统算法恢复出的图像, 图 3c 为分块稀疏算法恢复出的图像。图 4a 为采样率为 0.5 时采集到的煤矿井下工作通道图像, 图 4b 为用 CS 传

统算法恢复的图像, 图 4c 为用分块稀疏算法恢复的图像。PSNR 是目前公认的在重构图像的质量评价中应用最广泛的衡量标准, 在重构的过程中, 当重构图像的效果越好, 其重构图像的峰值信噪比越大, 当重构图像的峰值信噪比越小, 表明重构图像效果越差, 甚至到看不清图像的效果。



(a) 原图 (b) 传统算法 (c) 分块稀疏算法

图 3 煤矿井下综采工作面图像(总采样率 0.2 Hz)

Fig. 3 Image of fully-mechanized mining face in underground coal mine (total sampling rate was 0.2 Hz)



(a) 原图 (b) CS 算法 (c) 分块稀疏算法

图 4 煤矿井下工作通道图像(总采样率 0.5 Hz)

Fig. 4 Working channel image in underground coal mine (total sampling rate was 0.5 Hz)

下面分析传统 CS 算法与改进算法的 PSNR 性能, 图 5 和图 6 分别对应图 3a 和图 4a 在不同采样率下分别运行多次 CS 传统算法和分块稀疏算法取平均值的 PSNR。图 7 为在不同采样率下多次分别运行 CS 传统算法和分块稀疏算法取重构时间平均值后绘制的图形。

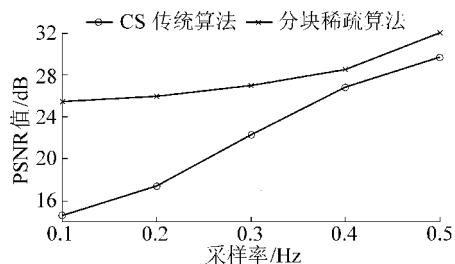


图 5 不同采样率下 2 种重构算法 PSNR 值(总采样率 0.2 Hz)

Fig. 5 PSNR values of two reconstruction algorithms at different frequencies (total sampling rate was 0.2 Hz)

总体来说, 2 种算法处理后图像的 PSNR 指标如图 5 和图 6 所示, 由图 5、图 6 可知, 图像 PSNR 随采样率的增加而增大, 图像的重构效果越来越好, 笔者采用的分块稀疏算法比 CS 传统算法具有更好

的重建效果,特别是在较低的采样率时,优势更加明显。随着采用率的逐渐增大,2 种重构算法的重构时间也是逐渐增大的。分开来讲,分块稀疏算法的 PSNR 值一直都处于比 CS 传统算法高的地位,在运行时间上,采样率为 0.1 Hz 时,CS 传统算法的进行时间为 0.59 s,分块稀疏算法的运行时间为 0.652 s,除 0.1 Hz 采样率外,其他采样率下 CS 传统算法的运行时间都大于分块稀疏算法。

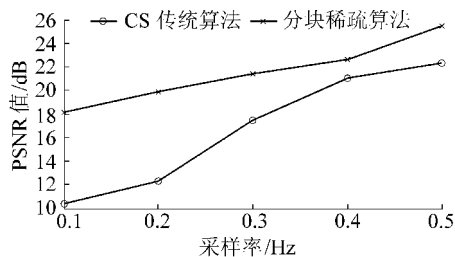


图 6 不同采样率下 2 种重构算法的 PSNR 值  
(总采样率 0.5 Hz)

Fig. 6 PSNR Values of two reconstruction algorithms at different frequencies (total sampling rate was 0.5 Hz)

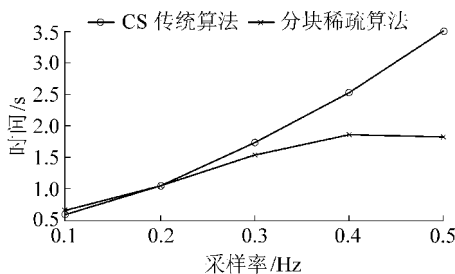


图 7 不同采样率时 2 种算法运行时间

Fig. 7 Running time of different sampling rates of two algorithms

另外,经分块稀疏算法处理的图像视觉辨识度很高,并且所需数据存储空间大幅减少,传输所需的能量也相对减少,为无线传感网络的节点节约了存储资源和能量。

## 4 结 语

传统采矿多依赖经验,凭借定性分析开采,精准开采是传统采矿与定量化智能化的高度结合,开发出多功能、多参数的智能传感器。智能新型感知与多网融合传输方法与技术装备是实现精准开采的技术支撑。随着煤矿物联网覆盖的范围越来越广,“人、机、物”三元世界在采场信息空间中的交互、融合所产生的数据越来越大,针对煤矿井下无线传感网络因信息传输量大,导致传感节点能量消耗快、设备寿命缩减和煤矿井中特殊环境下采集到的图像特点问题,在小波变换的基础上提出了分块稀疏算法,

经试验验证,在采样率相同的情况下,分块稀疏算法不仅需要的运行时间少,而且可以得到比 CS 传统算法高质量的图像,还可以采用更低的采样率获得较高的峰值信噪比,节约了资源。

## 参考文献 (References) :

- [1] 杜娟.煤矿物联网中压缩感知理论算法研究[D].南京:南京邮电大学,2011.
- [2] 孙继平.煤矿安全生产监控与通信技术[J].煤炭学报,2010,35(11):1925-1929.  
SUN Jiping. Study on safety production monitoring and communication technology in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1925-1929.
- [3] 袁亮.煤炭精准开采科学构想[J].煤炭学报,2017,42(1):1-7.  
YUAN Liang. Scientific concept of coal precision mining [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 1-7.
- [4] 吴立新,汪云甲,丁恩杰,等.三论数字矿山:借力物联网保障矿山安全与智能采矿[J].煤炭学报,2012,37(3):357-365.  
WU Lixin, WANG Yunjia, DING Enjie, et al. Thirdly study on digital mine: serve for mine safety and intellimine with support from IoT [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 357-364.
- [5] 张申,丁恩杰,徐钊,等.物联网与感知矿山专题讲座之三:感知矿山物联网的特征与关键技术[J].工矿自动化,2010(12):117-121.  
ZHANG Shen, DING Enjie, XU Zhao, et al. Part iii of lecture of internet of things and sensor mine-plan and construction of internet of things of sensor mine and coal enterprise [J]. Industry and Mining Automation, 2010(12): 117-121.
- [6] 张申,丁恩杰,徐钊,等.物联网与感知矿山专题讲座之一:物联网基本概念及典型应用[J].工矿自动化,2010(10):105-108.  
ZHANG Shen, DING Enjie, XU Zhao, et al. Part i of lecture of internet of things and sensor mine-plan and construction of internet of things of sensor mine and coal enterprise [J]. Industry and Mining Automation, 2010(10): 105-108.
- [7] 周云科.基于物联网的矿井数据采集监控系统[D].长沙:湖南大学,2014.
- [8] 邹国辉,纪彬.物联网在煤矿安全上的应用[J].黑龙江科学,2010(5):59-61.  
ZOU Guohui, JI Bin. Application of internet of things in coal mine safety [J]. Heilongjiang Science, 2010(5): 59-61.
- [9] 杨磊,黄友锐,唐超礼,等.一种煤矿井下图像压缩方法[J].工矿自动化,2015(8):82-84.  
YANG Lei, HUANG Yourui, TANG Chaoli, et al. A method of image compression in coal mine [J]. Industrial and Mining Automation, 2015(8): 82-84.
- [10] 刘洋.基于物联网的煤矿井下环境监测及人员定位系统的设计与实现[D].北京:北京交通大学,2012.
- [11] 江宁.基于压缩感知的图像编码重构研究[D].天津:天津

- 理工大学, 2014.
- [12] 周建秋. 基于压缩感知的遥感图像重构方法研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [13] 魏连云, 邓恒淹, 岳敏, 等. 基于小波变换的煤矿井下图像压缩处理研究[J]. 科技传播, 2009(10): 74-75.  
WEI Liyun, DENG Hengyan, YUE Min, *et al.* Research on coal mine image compression based on wavelet transform[J]. Science and Technology Communication, 2009(10): 74-75.
- [14] 高永清, 商丹. 煤矿井下工业图像编码系统的研究[J]. 华北科技学院学报, 2005(1): 44-47.  
GAO Yongqing, SHANG Dan. Research on the coal mine industry image coding system[J]. Journal of North China Institute of Technology, 2005(1): 44-47.
- [15] 赵贻斌. 稀疏模拟信号压缩采样与重构算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [16] 李云, 刘学诚. 小波变换在图像处理中的应用[J]. 计算机仿真, 2008, 25(6): 195-197.
- LI Yun, LIU Xuecheng. Application of wavelet transform in image processing[J]. Computer Simulation, 2008, 25(6): 195-197.
- [17] 王宝. 小波分析在信号去噪的应用研究[D]. 福州: 福州大学, 2013.
- [18] NEEDELL D, VERSHYNIN R. Uniform uncertainty principle and signal recovery via regularized orthogonal matching pursuit[J]. Foundations of Computational Mathematics, 2009, 9(3): 317-334.
- [19] 尹珠, 黄友锐, 陈珍萍. 煤矿井下压缩感知图像处理算法[J]. 工矿自动化, 2016(11): 38-41.  
YIN Zhu, HUANG Yourui, CHEN Zhenping. Coal mine compressed sensing image processing algorithm[J]. Industry and Mine Automation, 2016(11): 38-41.
- [20] 杨磊, 黄友锐, 唐超礼, 等. 改进型压缩感知图像算法在煤矿物联网中的研究[J]. 煤矿机械, 2015, 36(8): 318-319.  
YANG Lei, HUANG Yourui, TANG Chaoli, *et al.* Research on improved compressed sensing image algorithm in coal mine Internet of Things[J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(8): 318-319.

## (上接第207页)

- GE Hongbing. Application of coal cutter with large power and its technical development prospect[J]. Coal Mining Technology, 2010, 15(1): 4-7.
- [7] 高志明, 张伟. MG750/1815-GWD系列大功率厚煤层采煤机[J]. 煤矿开采, 2008, 13(6): 58-60.  
GAO Zhiming, ZHANG Wei. MG750/1815-GWD series coal cutter with large power for thick coal seam[J]. Coal Mining Technology, 2008, 13(6): 58-60.
- [8] 孟国营, 程晓涵. 我国矿用刮板输送机技术现状及发展分析[J]. 煤炭工程, 2014, 46(10): 58-60.  
MENG Guoying, CHENG Xiaohan. Analysis on current status and development of scraper conveyer[J]. Coal Engineering, 2014, 46(10): 58-60.
- [9] 刘斌. 浅析转载机在煤矿生产中的应用和维护[J]. 机电信息, 2014(3): 89-90.  
LIU Bin. Application and maintenance of transshipment machine in coal mine production[J]. Electromechanical Information, 2014(3): 89-90.
- [10] 李剑峰. 煤矿机械设计制造新技术新工艺[J]. 矿业装备, 2014(12): 31-32.  
LI Jianfeng. New technology and technology of coal mine machinery design and manufacture[J]. Mining Equipment, 2014(12): 31-32.
- [11] 王国法, 牛艳奇. 超前液压支架与围岩耦合支护系统及其适应性研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(9): 19-25.  
WANG Guofa, NIU Yanqi. Study on advance hydraulic powered support and surrounding rock coupling support system and suitability[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(9): 19-25.
- [12] 苏林军, 朱峰. 放顶煤液压支架的创新与发展[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(4): 84-88.  
SU Linjun, ZHU Feng. Innovation and development of hydraulic powered caving support[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(4): 84-88.
- [13] 程骏, 张严敬, 荣和芳. 7m大采高综采液压支架设计及配套[J]. 煤矿开采, 2013, 18(1): 25-27.  
CHENG Jun, ZHANG Yanjin, RONG Hefang. Design of powered support and equipments matching for 7m mining height[J]. Coal Mining Technology, 2013, 18(1): 25-27.
- [14] 王琦. 浅谈煤矿机械设计及制造[J]. 技术与市场, 2014(7): 40-41.  
WANG Qi. Design and manufacture of coal mine machinery[J]. Technology and Market, 2014(7): 40-41.