

# 压缩感知技术在矿山物联网中的应用研究

赵小虎<sup>1,2</sup> 邓园芳<sup>1,2</sup> 慕灯聪<sup>1,2</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 信息与电气工程学院,江苏 徐州 221008)

**摘要:** 针对矿山井下环境的特殊性导致井下监测到的海量信息的获取受到限制等问题,对目前备受关注的基于信号稀疏性的新型采样理论——压缩感知理论进行研究,以矿山物联网为研究对象,介绍了压缩感知基本理论及关键技术,分析了压缩感知理论在这个应用环境中的优势,理论上满足矿山物联网应用的需求。最后,利用 Matlab 仿真软件,对煤矿井下采集到的瓦斯浓度数据进行稀疏性分析、压缩与重构,结果表明压缩感知技术可以较精确地恢复原始瓦斯浓度信号。

**关键词:** 矿山物联网; 互联网+; 压缩感知; 稀疏性; 观测矩阵; 瓦斯浓度数据

**中图分类号:** TD65 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)07-0069-04

## Applied study on compressed sensing technology to mine internet of things

Zhao Xiaohu<sup>1,2</sup>, Deng Yuanfang<sup>1,2</sup>, Mu Dengcong<sup>1,2</sup>

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

2. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** According to a speciality of underground mine environment to cause problem of the limitation to obtain mass information measured in underground mine and others, a study was conducted on the present concerned compressed sensing theory – a new sampling theory based on the signal sparsity. Based on mine internet of things as study object, the paper introduced basic theory and key technology of the compressed sensing and analyzed advantages of the compressed sensing theory in application environment. Theoretically, the compressed sensing theory could meet application requirements of mine internet of things. Finally, the Matlab simulation software was applied to sparsity analysis, compression and reconstruction of the gas concentration data collected from underground mine and the results showed that original concentration signal could be accurately recovered by compressed sensing technology.

**Key words:** mine internet of things; internet plus; compressed sensing; sparsity; observation matrix; gas concentration data

## 0 引 言

煤炭是我国重要的基础性能源,在国民经济发展建设中具有举足轻重的作用<sup>[1]</sup>。为了使我国的国民经济持续迅速增长,仍需在很长一段时间保证煤炭的产量与质量,并且在实现煤炭开采的安全化、智能化方面有迫切的需求。2015年3月5日,李克强总理在政府工作报告中提出,“制定‘互联网+’行动计划,推动移动互联网、云计算、大数据、物联网等与现代制造业结合,促进电子商务、工业互联网和互联网金融健康发展,引导互联网企业拓展国际市

场。”可见,将“互联网+”应用到煤矿中,有一定的必要性。近年来,数字矿山、智慧矿山以及感知矿山的概念被先后提出,其中“感知矿山”是物联网技术在矿山中的具体应用,是数字矿山、矿山综合自动化概念的升华<sup>[2-6]</sup>。它将物联网技术应用在煤矿环境中,提高了井下作业的安全性与可见性,改变了传统的矿山作业方式。目前,我国已成功地将物联网技术应用到了井下生产的很多方面。例如井下人员定位系统、瓦斯监控系统、矿震监测系统、水文监测系统、输送带运输监控系统、绞车运输监控系统等,大幅改善了井下低自动化水平,低数字化监控水平的

收稿日期:2016-02-11;责任编辑:赵 瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.07.012

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014ZDPY19);国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801405)

作者简介:赵小虎(1976—)男,江苏徐州人,副教授,博士生导师。Tel:0516-83999713, E-mail: xiaohuzhao@126.com

引用格式:赵小虎,邓园芳,慕灯聪.压缩感知技术在矿山物联网中的应用研究[J].煤炭科学技术,2016,44(7):69-72,79.

Zhao Xiaohu, Deng Yuanfang, Mu Dengcong. Applied study on compressed sensing technology to mine internet of things [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 69-72, 79.

现状,提高了井下生产效率、安全水平。

由于煤矿井下工作环境的特殊性,需在井下布置大量的传感器节点监测各类信号,如瓦斯浓度、矿震数据、温度、湿度信号等。在矿山物联网中,众多的传感器节点处理的数据量庞大,而节点能量有限,传输带宽也有限,硬件上难以实现,且井下节点能量补充非常困难,难以适应大量数据的收集。为了延长节点生命周期,如何减少信息传输量和节点的计算量,延长网络中节点的生命周期,是当前需要解决的问题。而数据压缩是一种能有效减少数据量的数据处理技术。压缩感知理论<sup>[7-8]</sup>是一个介于数学和信息科学的新研究方向,其开创性地指出对可稀疏表示的信号,能够利用少量的线性观测值表示,通过非线性方法重建,恰好满足矿山物联网的应用需求。

目前,将压缩感知理论应用到煤矿中的研究尚属于理论研究的起步阶段。徐永刚<sup>[9]</sup>将压缩感知理论引入到物联网背景下的下一代煤矿通信系统中,利用前沿的信息处理理论和技术,通过对源端数据的压缩采集理论方法研究,为克服矿山信息传输瓶颈问题进行了学科前沿探索。杜鹃<sup>[10]</sup>针对煤矿物联网这个应用环境,提出了改进的基于小波变换LSC-CS理论,基于Matlab仿真平台,模拟井下环境,对温度、湿度数据进行仿真,但在小波变换的过程中会出现边缘效应。矿山物联网对煤矿井下环境监测及人员定位起着非常重要的作用。节点的能量决定了整个网络生命周期及网络可靠性。压缩感知理论对少量数据进行采集,降低了能耗,延长了网络的生命周期,提高了网络的可靠性。基于此,笔者采用压缩感知理论对井下监测到的瓦斯浓度信号进行压缩仿真,仿真结果表明,压缩感知理论在能耗、可靠性和对提高信号重构精度方面有明显效果。

## 1 压缩感知理论

压缩感知是Donoho<sup>[7]</sup>在2006年提出的信号处理新理论,因其低速信息采样的特性引起了各界学者广泛的关注。传统的信号获取和处理过程主要包括采样、压缩、传输和解压4个部分,其采样过程必须满足香农定理,即采样频率不能低于模拟信号频率中最高频率的2倍。随着信息需求量的增加,携带信息的信号带宽也越来越大,对宽带信号处理和采样速率的要求也越来越高。而压缩感知只研究信号的稀疏性,不考虑传统意义上的带宽要求,为高带宽信号的采集提供了新思路和新途径。

压缩感知过程可以描述为:当某一信号满足稀疏性或可在某个变换域中可以被稀疏表示时,压缩感知理论能够以较少的测量信号精确重构被测量信号。压缩感知理论框架如图1所示,压缩感知的3个基本核心问题是稀疏变换、观测矩阵和重构。

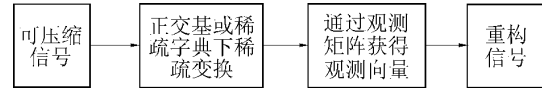


图1 压缩感知理论框架

Fig. 1 Framework of compressed sensing theory

信号是稀疏的或在某种变换下可稀疏表示是压缩感知的先决条件。对于一个长度为 $N$ 的信号 $x$ ,若其能在某种变换下可稀疏表示或近似稀疏表示,则可通过压缩感知方法对其进行采样压缩。根据调和分析理论<sup>[11]</sup>, $x$ 能用1组标准正交基 $\Psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N]$ 的线性组合表示为

$$x = \sum_{k=1}^N \psi_k \theta_k = \Psi \theta \quad (1)$$

其中: $\Psi$ 为 $N \times N$ 维标准正交基; $\theta$ 为信号 $x$ 在该正交基上展开的系数向量,若 $x$ 在 $\Psi$ 上有且仅有 $k$ ( $k \ll N$ )个非零系数,则 $x$ 可在 $\Psi$ 上稀疏表示。文献[12]指出,信号的稀疏度 $k$ 越小,稀疏性越强,保证信号重构所需的测量次数越少,对其压缩感知的价值和效率越高。一般情况下,普通信号在时域是不稀疏的,因此,要应用压缩感知,首先要对信号进行稀疏变换,找到信号的稀疏域。常用的比较典型的信号稀疏基有Fourier基(频域)、小波变换基、离散余弦变换域等。

测量矩阵是对信号获取的一种方法,是压缩感知的主体。为了精确地重构原始信号,对信号的线性投影采用一个与稀疏变换矩阵不相关的、满足约束等距性RIP(Restricted Isometry Property)<sup>[13-14]</sup>条件的 $M \times N$ ( $M \ll N$ )维测量矩阵 $\Phi$ ,对信号 $x$ 压缩观测,得到感知测量值 $y = \Phi x$ ,构造的测量矩阵要求信号从 $x$ 转换为 $y$ 的过程中获取的 $k$ 个测量值能够保留原始信号的全部信息,以保证信号的精确重构。但限制等距性是很难计算的,Donoho<sup>[7]</sup>提出的相关性判别理论即互相关系数可以较为直观地判别某一测量矩阵的形态。互相关系数可由式(2)求得。

$$u(\Phi, \Psi) = \sqrt{N} \max_{1 \leq i, j \leq N} |\langle \phi_i, \psi_j \rangle| = \sqrt{N} \max_{1 \leq i, j \leq N} |A(i, j)| \quad (2)$$

式中:  $A$  为观测算子;  $i \in \{1, 2, \dots, M\}$ ,  $j \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。当  $\phi$  和  $\Psi$  均为正交矩阵时, 相关系数的范围  $u(\phi, \Psi) \in [1/\sqrt{N}, 1]$ 。相关系数越小, 观测值携带的有用信息就越多, 准确重构信号的概率就越高。目前较常用的测量矩阵有随机高斯测量矩阵、随机贝努力矩阵、部分正交矩阵、稀疏随机矩阵等。

信号重构是已知测量值  $y$  和测量矩阵  $\phi$  来恢复原始信号  $x$ , 运用压缩测量的低维数据精确的重构高维的原始信号, 即利用  $M$  维测量值重建  $N$  ( $M \ll N$ ) 维信号的过程。该过程可以归结为一个寻求约束条件下的最优解问题。

$$\min \|x\|_{l_0} \text{ s. t. } \phi\Psi^{-1}x = y \quad (3)$$

其中:  $\|\cdot\|_{l_0}$  表示  $l_0$  范数, 即向量  $\theta$  中非零元素的数量。在信号传输和存储过程中只需要对信号  $y$  进行操作。目前重构算法<sup>[15-18]</sup>主要有: 基于  $l_1$  范数的凸优化算法, 基于  $l_0$  范数的贪婪算法, 匹配追踪算法, 组合算法。压缩采样各分量如图 2 所示, 其中  $\phi\Psi = A^{cs}$ ,  $A^{cs}$  被称为观测算子, 也被称为冗余字典, 通常简记为  $A$ 。

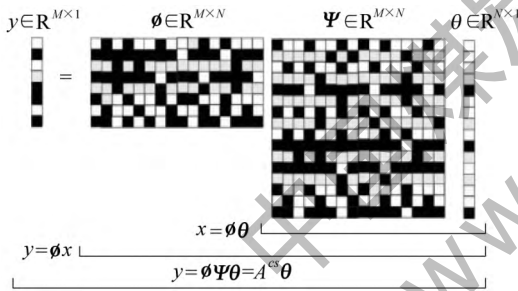


图 2 压缩采样各分量

Fig. 2 Component diagram of compressed sampling

## 2 压缩感知在矿山物联网应用中的优势分析

矿山物联网是在物联网基础上发展起来的, 将物联网理论应用在煤矿井下进行信息交换和通信, 就形成了矿山物联网。矿山物联网利用物联网技术, 采集大量的井下人员、设备及环境信息, 对于促进矿山安全生产和提高生产效率及避难抢险等具有重要意义。然而煤矿井下无线传感器网络<sup>[19]</sup>因其特殊环境限制, 在监测区域内通常部署大量的传感器节点, 众多的传感器节点采集了大量数据, 又因传感器节点的能量、存储空间和计算能力非常有限, 井下环境的特殊性使得如何延长节点的生存时间是亟待解决的问题。

虽然现有的压缩技术有无损压缩和有损压缩算法等成熟实用的算法, 但不是针对无线传感器网络这类资源受限系统的应用而设计的。节点硬件资源不同使其对数据压缩的性能要求不同。节省每一个要传送的字节都有益于节能, 但数据压缩是以增加数据处理的能耗来降低总能耗, 算法所能获得的压缩率、数据精度等性能还受到能量和存储空间的制约。与其他的数据压缩融合技术相比, 压缩感知理论比较适合应用于无线传感器网络。在该理论框架下, 采样速率主要决定于信息在信号中的稀疏性和非相关性, 而不决定于信号带宽。

将压缩感知应用在无线传感器网络中的优点如下: 编码的低计算复杂度; 优异的压缩性能; 编解码相互独立; 高效的精确重构算法。运用压缩感知理论, 信号只需在随机测量矩阵  $\phi$  上进行线性投影, 便可计算出压缩后的观测向量, 对于  $k$  稀疏的  $N$  ( $M \ll N$ ) 维信号只需要  $M = ck$  ( $c$  为常数,  $c \geq 4$ ) 维的观测向量, 采用合适的重构算法, 便可精确重构原始信号。上面所述的压缩感知优点使得其特别适用在资源受限的矿山物联网中, 只要节点感知到的数据是可压缩的(在某些正交基上可以稀疏表示或近似稀疏表示), 便可运用压缩感知相关算法进行数据压缩和重构。

## 3 压缩感知在井下瓦斯浓度数据应用的分析

在矿山物联网中部署的传感器节点采集到的数据中, 包含大量的井下温湿度、瓦斯浓度、氧气浓度、风压、水压等环境信息的变化, 这些信息对于井下工作人员和煤矿的安全生产具有重要意义。其中, 瓦斯浓度是重点监测的对象<sup>[20]</sup>, 因为瓦斯爆炸有一定的浓度范围, 当浓度达到瓦斯爆炸界限时, 遇火会引发爆炸, 严重威胁矿井生产安全。所以, 要实时监测井下瓦斯浓度的变化, 但由于节点众多, 采集到的数据量非常大, 有必要通过数据压缩对其进行处理, 以减小数据存储空间。

1) 采用压缩感知理论对井下监测到的瓦斯浓度信号进行分析。随机选取 512 个瓦斯浓度数据, 由于压缩感知是建立在信号可以在某个基下稀疏表示或近似稀疏表示的基础上, 所以首先分析瓦斯信号的稀疏性。采用 *Fourier* 标准正交基  $\Psi$  对数据进行稀疏性变换, 其变换结果如图 3 所示。结果表明瓦斯信号具有稀疏性, 因此, 可以采用压缩感知对瓦

斯数据进行压缩采样。

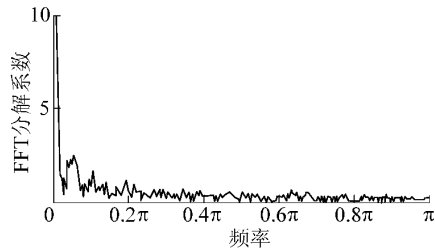


图3 瓦斯信号稀疏分解系数与频率关系曲线

Fig. 3 Relationship curve of gas signal sparse decomposition coefficient and frequency

2) 对瓦斯数据进行线性投影,得到感知测量值。通过变换得到稀疏系数向量  $\theta = \Psi^T x$  后,对信号的线性投影采用与稀疏变换矩阵不相关的高斯随机测量矩阵  $\phi$ ,得到观测值  $y = \phi x$ 。然后,对瓦斯数据进行重构。用正交匹配追踪(OMP)算法对信号进行重构,OMP算法的基本思想是:以贪婪迭代的方法选择  $\theta$  的列,使得在每次迭代过程中选择的列与当前的冗余向量最大程度的相关,从测量向量中减去相关部分并反复迭代,直到迭代次数达到信号稀疏度  $k$ ,强制停止迭代。其算法流程如下:①初始化  $r_0 = y, \Gamma_0 = \emptyset, t = 1$  ( $r_0$ 为初始残差,  $\Gamma_0$ 为初始备选原子索引,  $t$ 为迭代次数); While  $t < ck$ ; ②找到索引  $\lambda_t$ ,使得  $\lambda_t = \arg \max | \langle r_{t-1}, A \{1, 2, \dots, N\} - \Gamma_{t-1} \rangle |$ ; ③更新索引集  $\Gamma_t = \Gamma_{t-1} \cup \{\lambda_t\}$ ,以及原子集合  $A_{\Gamma_t} = A_{\Gamma_{t-1}} \cup \{A_{\lambda_t}\}$ ; ④利用最小二乘法求得近似解  $x_t = (A_{\Gamma_t}^T A_{\Gamma_t})^{-1} A_{\Gamma_t}^T y$ ; ⑤利用新的残差  $r_t = y - A_{\Gamma_t} x_t$ ; ⑥  $t = t + 1$ ,如果  $t > k$  或  $r_t$  满足预设的误差要求,令重建信号  $\hat{x} = x_t, r = r_t$ ,输出  $\hat{x}$  和  $r$ ,否则返回步骤②。采用 OMP 算法重构的结果如图 4 所示。

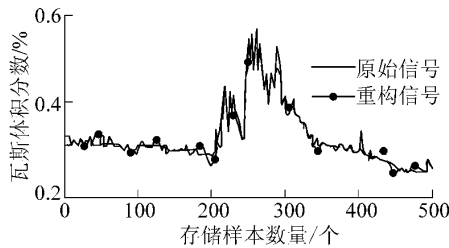


图4 正交匹配追踪(OMP)算法重构结果

Fig. 4 Results of Orthogonal Matching Pursuit (OMP) algorithm reconstruction

3) 对原始数据和重构数据进行误差分析,如图 5 所示。从仿真结果可知:随着测量数的增大,用压缩感知相关算法恢复的瓦斯浓度信号与原始的瓦斯数据信号的误差越小。此结果表明,压缩感知可以

应用于井下大量瓦斯数据的压缩处理。

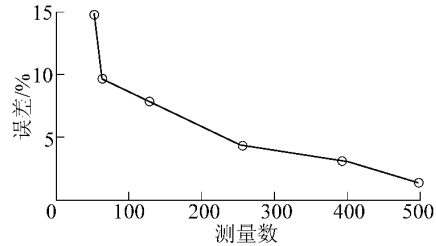


图5 原始数据和重构数据误差结果

Fig. 5 Result of data error between original data and reconstruction data

### 4 结 语

随着“互联网+”时代的到来,人们对信息量的需求越来越多,信息带宽也越来越宽,传统的采样理论已不能满足需求。压缩感知是一种新颖的信息采集和压缩理论,开创性地指出对可稀疏信号,能够利用少量的线性观测并通过得自适应性重建获得,克服了传统的采样理论对带宽、传输速率、数据存储等面临的问题。将压缩感知问题运用在矿山物联网中的研究前景非常广阔。虽然矿山物联网数据压缩感知的研究还处于起步阶段,还有许多问题亟待解决,但压缩感知开创性的数据压缩采集理论体系,对于矿山井下庞大的信息采集与处理具有很高的研究价值。

#### 参考文献(References):

[1] 国家安全生产监督管理局,国家煤矿安全监察局.煤矿安全规程[M].北京:煤炭工业出版社,2014.

[2] 张申,丁恩杰,徐钊等.物联网与感知矿山专题讲座之四:感知矿山物联网与煤炭行业物联网规划建设[J].工矿自动化,2011(1):105-108.  
Zhang Shen, Ding Enjie, Xu Zhao et al. Part IV 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 Mine Automation, 2011(1): 105-108.

[3] 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 sensormine-plan and construction of internet of things of sensor mine and coal enterprise [J]. Industry and Mine Automation, 2010, 12: 117-121.

[4] 张申,丁恩杰,徐钊等.物联网与感知矿山专题讲座之二:感知矿山与数字矿山、矿山综合自动化[J].工矿自动化,2010(11):129-132.

(下转第79页)

- Manufacturing Automation 2009 31(12): 132-134.
- [9] 李昊旻, 卢建军, 卫晨. 基于云计算的煤矿安全监测预警系统研究[J]. 工矿自动化 2013(3): 46-49.  
Li Haomin, Lu Jianjun, Wei Chen. Research of coal mine safety monitoring and early warning system based on cloud computing [J]. Industry and Mine Automation 2013(3): 46-49.
- [10] 李文栋. 基于 Spark 的大数据挖掘技术的研究与实现[D]. 济南: 山东大学 2015.
- [11] 祁运田. 煤矿安全决策支持系统的设计与实现[D]. 淮南: 安徽理工大学 2009.
- [12] 孙继平. “互联网+煤炭”与煤矿信息化[J]. 煤炭经济研究, 2015(10): 16-19.  
Sun Jiping. "Internet + coal" and coal mine informatization [J]. Coal Economic Research 2015(10): 16-19.
- [13] 钱建生, 马姗姗, 孙彦景. 基于物联网的煤矿综合自动化系统设计[J]. 煤炭科学技术 2011 39(2): 73-76.  
Qian Jiansheng, Ma Shanshan, Sun Yanjing. Design on mine comprehensive automation system based on internet of things [J]. Coal Science and Technology 2011 39(2): 73-76.
- [14] 孟建良, 刘德超. 一种基于 Spark 和聚类分析的辨识电力系统不良数据新方法[J]. 电力系统保护与控制 2016 44(3): 85-91.  
Meng Jianliang, Liu Dechao. A new method for identifying bad data of power system based on spark and clustering analysis [J]. Power System Protection and Control 2016 44(3): 85-91.
- [15] 王华. 基于 YARN 的数据挖掘系统的设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学 2015.
- [16] 汤九斌. 基于数据挖掘技术的决策支持系统及其关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学 2009.
- [17] 王连, 徐顺. 基于数据挖掘的决策支持系统及应用研究[J]. 无线互联科技 2015(22): 41-42.  
Wang Lian, Xu Shun. Research on decision support system based on data mining and its application [J]. Wireless Internet Technology 2015(22): 41-42.
- [18] 温国谊, 查光东, 张翔. 基于 CLIPS 的某型飞机故障诊断专家系统的设计与实现[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(S1): 157-161.  
Wen Guoyi, Zha Guangdong, Zhang Xiang. Design and realize of a plane's expert system development for fault diagnosis based on CLIPS [J]. Journal of Central South University: Natural Science, 2013 44(S1): 157-161.
- [19] 刘海英. 基于关系数据库的专家系统外壳的设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学 2006.
- [20] 韦辽. 在 C#.NET 中调用 CLIPS 的技术实现与应用[J]. 机械工程师 2015(2): 39-41.  
Wei Liao. Implementation and application of calling CLIPS technology of C#.NET [J]. Mechanical Engineer 2015(2): 39-41.
- ~~~~~
- (上接第 72 页)
- Zhang Shen, Ding Enjie, Xu Zhao *et al.* Part II 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 Mine Automation 2010(11): 129-132.
- [5] 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 Mine Automation 2010(10): 105-108.
- [6] 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): 357-364.  
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.
- [7] Donoho D L. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory 2006 52(4): 1289-1306.
- [8] Candes E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. IEEE Transactions on Information Theory 2006 52(2): 489-509.
- [9] 徐永刚. 矿山数据压缩采集与重建方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学 2013.
- [10] 杜鹃. 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.
- [11] 苗长兴. 偏微分方程的调和分析方法简介[J]. 数学进展, 2007 36(6): 641-671.  
Miao Changxing. Partial differential equation of the harmonic analysis method of introduction [J]. Advanced in Mathematics 2007, 36(6): 641-671.
- [12] Candes E, Tao T. Near-optimal signal recovery from random projections and universal encoding strategies [J]. IEEE Transactions on Information Theory 2006 52(12): 5406-5425.
- [13] Candes E. The restricted isometry property and its implications for compressed sensing [J]. Comptes Rendus Mathematique 2008, 346(9): 589-592.
- [14] Baraniuk R. A lecture on compressive sensing [J]. IEEE Signal Processing Magazine 2007 24(4): 118-121.
- [15] Needl I D, Tropp J A. CoSaMP: Iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis 2009 26(3): 301-321.
- [16] 张宁. 压缩感知重建算法的若干研究[D]. 南京: 南京邮电大学 2013.
- [17] 宁刚. 基于压缩感知的信号重构算法研究[D]. 长春: 吉林大学 2010.
- [18] 郭永红. 基于贪婪追踪的压缩感知重建算法研究[D]. 成都: 电子科技大学 2012.
- [19] 孙利民, 李建中, 陈渝等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社 2005: 391-402.
- [20] 王昕, 丁恩杰, 周兴. 基于 WSN 的井下道瓦斯监测系统设计与实现[J]. 煤矿机械 2009 30(8): 37-40.  
Wang Xin, Ding Enjie, Zhou Xing. Mine gas monitoring system design based on WSN [J]. Coal Mine Machinery 2009 30(8): 37-40.