

杨健健 符世琛 姜海等. 基于模糊判据的煤岩性状截割硬度识别[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S2): 540-545. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0526

Yang Jianjian, Fu Shichen, Jiang Hai, et al. Recognition of cutting hardness of coal rock properties based on fuzzy criteria[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S2): 540-545. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0526

## 基于模糊判据的煤岩性状截割硬度识别

杨健健 符世琛 姜海 赵新赢 吴淼

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院 北京 100083)

**摘要:** 针对现有煤岩性状识别方法不能满足采煤机滚筒实现自动调高技术的需求,提出了基于模糊判据的煤岩性状截割硬度识别研究方法,克服了识别煤岩性状截割硬度依赖滚筒振动信号或截割电机信号等单一传感器信息判据的不全面、不可靠等问题,利用多传感器信息融合的模糊集合隶属函数,根据摇臂振动信号两层小波包分解各个频段能量特征向量和采煤机感知煤岩硬度关系公式,采用加权平均法求解隶属度作为煤岩性状截割硬度因子判别煤岩性状的依据,定义表征煤岩性状的截割硬度因子 $q$ ,其数值计算通过求解煤岩性状模糊集隶属度 $\mu_Q(u)$ 获得。煤矿井下实测数据表明煤岩性状截割硬度模糊集合的方法更贴近实际采掘煤岩工况,为实现滚筒自动识别煤岩性状控制摇臂自动调高奠定模糊理论基础。

**关键词:** 煤岩性状; 截割硬度因子; 模糊集合; 隶属函数

中图分类号: TD421.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2015)S2-0540-06

### Recognition of cutting hardness of coal rock properties based on fuzzy criteria

YANG Jian-jian, FU Shi-chen, JIANG Hai, ZHAO Xin-ying, WU Miao

(School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** The current recognition methods of coal and rock properties cannot meet the needs of automatic adjustment of shearer drum height. This paper put forward a method for recognizing coal and rock hardness factor characters based on fuzzy criterion, and overcome the problems that the criterion of recognizing the coal and rock characteristics relying on single sensor information is not comprehensive and reliable. According to the radial vibration signals of two layers wavelet packet decomposition of each frequency band energy feature vector and the hardness of coal mining machine perception relation formula, a fuzzy membership function was built. Refer to membership degree as the coal and rock characteristics of cutting coal and rock hardness factor distinguishing traits by using the weighted average method, the coal and rock properties characterization cutting hardness factor  $q$  was defined, and its value was equal to the coal and rock characteristics of fuzzy membership degree. The measured data show that the characteristics of coal cutting hardness of the fuzzy set method is more close to actual mining coal and rock conditions. In order to realize the automatic recognition of coal and rock properties for automatically controlling the roller rocker arm height adjustment, the study establishes the fuzzy theory foundation.

**Key words:** coal and rock character; cutting hardness factor; fuzzy set; membership function

目前煤矿采掘工作面的煤岩性状识别是指采掘装备截割介质的煤岩属性识别,集中表现在硬度、灰

度、放射性元素含量等不同物理化学特性上,采掘装备可靠性低,缺少难以获取采掘装备作业过程中的煤

岩性状、机器姿态、作业工况等信息,影响采掘装备生产能力与人员安全。我国采掘装备可靠性智能化指标仅为国外装备的 30%~50%,煤矿井下无人采掘技术是我国煤炭行业高新技术的未来发展目标,《国家能源科技“十二五”规划(2011—2015)》确定的重点技术突破领域就包括无人开采技术,明确提出要重点研究煤岩性状自动识别技术等,实现采掘工作面自动化与无人化<sup>[1]</sup>。

针对采掘装备感知煤岩性状的研究有很多,从研究对象上可分为硬度、放射性元素含量、图像灰度等不同煤岩性质,其中文献[2-4]提出检测采煤机摇臂或机身振动信号的强度和频谱的差异识别煤岩性状,这种方法没有考虑区别采煤机设备传动及牵引过煤时引起的振动。文献[5-7]提出利用主动或被动检测 $\gamma$ 射线的方法检测煤层厚度,这种方法要求煤岩体中有明显差异的放射性元素含量,实用和推广性受限较大。文献[8-11]提出利用声与振动的联合方式识别煤层厚度的方法,该方法受噪声和干扰影响较大,识别精度较低。文献[12]提出利用图像的方法识别煤岩性状表面颜色、纹路的差异,这种方法只局限于煤岩样本在实验室进行图像检测,差异性才较为明显。文献[13]利用地理信息技术实现煤岩界面分层预测在理论分析阶段有所成果,但实际分辨率不足以实现工作面小构造体的采煤机控制。文献[14]针对截割电机的电流阈值判断滚筒截割煤岩,因为成果是在实验室模拟环境下完成的,不能准确说明煤矿井下实际问题,且井下供电电压波动较大,判断指标单一。

本文通过研究采掘装备感知截割煤岩性状的变化,主要是硬度的变化引起采掘装备各种机载传感器监测量的变化,比如截割电机的电流和电压、调高油缸的压力、振动强度等。因为采掘工作面煤层结构的多变性,以及煤层与顶底板岩层分界面的复杂、渐变特性,使得截割机构体积较大的采掘装备,实际截割煤岩时会截割多层煤岩结构。所以,单一判定截割煤或截割岩,以及传统上精确判别煤岩分界面的方法都是不符合现场采掘装备截割实际需求的,本文通过融合多传感信息判据,创新性利用模糊数学方法定义能够表征煤岩性状的截割硬度因子,实现采掘装备自主识别煤岩性状截割硬度,奠定了无人装备截割煤岩的技术理论基础。

## 1 模糊识别的基本原理

模糊数学是解释和研究模糊性现象的一种理论和方法,又称 Fuzzy 数学。 $A(u)$  用来描述集合  $A$  到集

合 $\{0,1\}$ 上的映射。模糊数学表示的是对象属于某集合的程度,用区间 $[0,1]$ 以内的数值来描述,模糊程度数值上愈靠近 1,表示该对象符合概念的程度愈大,反之程度愈小。模糊集的数学概念,揭示更多的现实规律。

设模糊子集在域  $U$  上的映射如下:

$$\mu_A: U \rightarrow [0,1] \quad (1)$$

其中称集合  $A$  为被  $\mu$  确定  $U$  上的一个模糊子集。模糊子集  $A$  的隶属函数记为  $\mu$ ,对象  $u$  对子集  $A$  的隶属度记为  $\mu_A(u)$ ,它代表  $u$  符合  $A$  的程度。特殊情况,当  $A(u)$  只取 0 或 1 两个值时,模糊集中的隶属函数便退化为普通集合的特征函数,模糊集合  $A$  就同样的退化为一个普通集合。

在工程实际应用中,通常实际问题中构成的模糊集是由多个元素组成的,式(2)中总域  $U$  可表示为多个元素集合的 Descartes 乘积,即

$$U = U_1 \times U_2 \times \cdots \times U_n \quad (2)$$

设  $A_i \in F(U_i)$  ( $i=1,2,\dots,n$ ),复合方式常采用加权平均型、乘积平均型和混合型。

加权平均型方法是设模糊集  $A(u)$  包含  $A_1(u_1), A_2(u_2), \dots, A_n(u_n)$ ,令

$$A(u) = \sum_{i=1}^n \delta_i A_i(u_i) \quad (3)$$

式中  $\delta_i$  为权重向量  $\delta$  的第  $i$  个因素,反映了第  $i$  个因素的重要程度,并且满足

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = 1, \delta_i (i=1,2,\dots,n) \quad (4)$$

综上所述,本文利用采掘装备多个传感器复合信息特征实现煤岩性状截割硬度识别,各个传感信息均为激励响应的间接信息,考虑信息之间的相对独立性,本文采用加权平均型模糊函数隶属度计算方法。

## 2 煤岩性状截割硬度因子

### 2.1 煤岩性状分界

煤层与顶板和底板岩层分界面(简称煤岩性状分界)是指煤矿井下煤层和岩层在地质结构分布上的接触面。煤层的结构和顶底板构成示意图 1 所示<sup>[15-16]</sup>。煤层一般根据赋存厚度划分为多个层级,分别为极薄煤层( $<0.5$  m)、薄煤层( $0.5 \sim 1.3$  m)、中厚煤层( $1.3 \sim 3.5$  m)、厚煤层( $>3.5$  m)。煤层的结构由简单(无夹层)和中度复杂(含有少数夹层)变化到非常复杂(大量交互夹层)。

以综采工作面采煤机截割煤岩为例,司机根据顶板或底板情况确定截割工艺,根据顶、底板的走势做

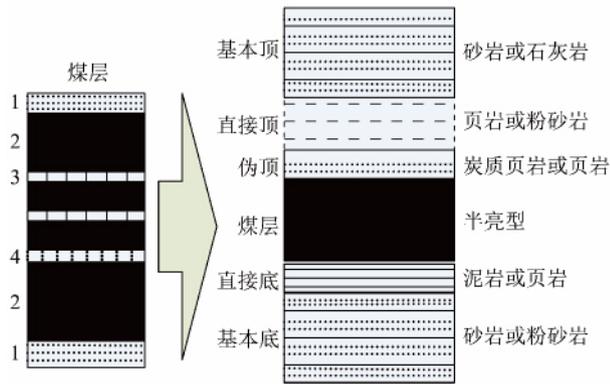


图 1 煤层结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coal seam

1—细砂岩; 2—煤; 3—炭质岩; 4—粉砂岩

“仿形”截割。各个煤矿针对综采工作面煤层地质条件制定生产操作规程,明确必要时可预留顶煤(100~200 mm),以防止冒顶、漏矸,同时避免了采煤机滚筒截齿直接截割顶板岩石,一方面保护了顶板整体不被破坏,另一方面又保护了采煤机设备可靠、高效。

因此,煤岩性状截割硬度体现采煤机滚筒截割煤岩及顶底板实际情况,模糊识别辨识采煤机滚筒截割煤岩硬度的范围及大小符合实际工作情况,有利于合理控制采煤机自动截割滚筒调高。

## 2.2 煤岩性状截割硬度因子定义

在煤岩地质构造学中表征岩石硬度的方法通常采用由俄罗斯学者于1926年提出的岩石坚固性系数(又称普氏系数 $f$ )代表分级岩石的普氏系数,是岩石坚固性的量化指标,同时用来表示岩石在破碎时的难易程度。在实际的煤层地质构造中,煤岩分布是随机的,而且根据煤层与顶底板岩层的交互渐变接触构造,定义煤岩性状截割硬度为模糊集合。

集合 $U$ 定义为采煤机滚筒煤岩性状截割硬度属性。

$$\{u \in U \mid u \text{ 为采煤机滚筒截割煤岩性状硬度属性,空载} \leq u < \text{全岩}\}$$

传统的煤岩性状识别要求的结果是截割煤或截割岩,经典数学集合的概念是集合 $U$ 中元素 $u$ 的关系为 $u \in U$ 或 $u \notin U$ 两种情况,表示为煤岩性状的明确分界。但采煤机滚筒除了理想情况下截割全煤外,而现实中的实际工况中是在截割煤层夹矸,或割到了顶板,程度上有多有少,所以对于采煤机滚筒而言,煤岩性状截割硬度会是一个模糊的范围,模糊数学的概念用于描述采煤机煤岩性状截割硬度属性取值范围,也即为煤岩性状截割硬度属性的模糊集合。

确定煤岩性状截割硬度属性是全集 $U$ 上的模糊

集合 $Q$ ,建立映射从全集 $U$ 到集合 $[0, 1]$ 有式(5)和式(6)。

$$\mu_Q: U \rightarrow [0, 1] \quad (5)$$

$$u \rightarrow \mu_Q(u \in [0, 1]) \quad (6)$$

式中 $\mu_Q$ 为硬度属性模糊集合 $Q$ 的隶属函数, $\mu_Q(u)$ 为硬度属性元素 $u$ 对 $Q$ 的隶属度。

利用采煤机机身和截割部布置多传感器,采集截割不同硬度煤岩性状时的振动、电机、油缸等传感器信息,利用模糊集合的数学方法完成煤岩性状截割硬度的模糊识别,完成采煤机自动识别截割介质,实现采煤机滚筒调高自动化控制。

设采煤机煤岩性状截割硬度因子 $q \in [0, 1]$ , $0$ 代表截割煤岩硬度为 $0$ ,对应采煤工况是滚筒空载; $0 \sim 1$ 代表截割煤岩硬度属性介于岩石硬度与空载; $1$ 滚筒截割岩石的硬度。

$$q = \mu_Q(\Delta C, V, f) \quad (7)$$

式中, $V$ 为采煤机姿态参数( $0$ 代表摇臂最高位置, $1$ 代表摇臂最低位置); $\Delta C$ 为截割煤岩性状不同硬度下摇臂处振动信号特征容差向量; $f$ 为截割电机功率信息反映的表征煤岩硬度的普氏系数。

综上所述, $q$ 代表的采煤机煤岩性状截割硬度因子与硬度属性模糊集合中的隶属度 $\mu_Q(u)$ 的概念在物理含义和数学定义上得到了统一。利用模糊数学隶属函数的计算方法处理多传感器信息,计算介于 $0 \sim 1$ 之间的从属于模糊集合的隶属度。

## 3 截割硬度模糊识别

### 3.1 截割硬度隶属函数

采煤机的多传感器信息包括截割机电电压电流信息、摇臂振动信号、摇臂调高油缸载荷信号、采煤机牵引速度、采煤机位姿信息等,每一类信息元素隶属的集合均可由若干个模糊集合表示,此时的论域表示为 $n$ 个因素集的Descartes乘积,如式(8)所示。

$$U = U_1 \times U_2 \times U_3 \times \cdots \times U_n \quad (8)$$

式中, $U_1$ 为截割机电电压电流信息; $U_2$ 为摇臂振动信号; $U_3$ 为摇臂调高油缸载荷信号; $U_n$ 为其他影响因素。

$\mu_{Q_i}: U_i \rightarrow [0, 1] (i = 1, 2, \dots, n)$ 定义为煤岩性状截割硬度因子隶属函数,其中 $\mu_{Q_i} \in F(U)$ , $\mu_Q$ 由 $\mu_{Q_1}, \mu_{Q_2}, \dots, \mu_{Q_n}$ 多元素模糊隶属函数复合而成,复合方式采用加权平均型。

令 $A(u) = \mu_Q(u), \mu_i \rightarrow \mu_{Q_i} (u_i \in [0, 1])$ , $i$ 为多种影响因素。设截割硬度隶属函数 $A(u)$ 是由截割电机因素识别截割硬度隶属函数 $A_1(u_1)$ 、振动信号识别截割硬度隶属函数 $A_2(u_2), \dots$ 组成。

$$A(u) = \sum_{i=1}^n \delta_i A_i(u_i) \quad (9)$$

式中  $(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n)$  为权重向量, 表征影响采煤机煤岩截割硬度影响重要程度, 且满足  $\sum_{i=1}^n \delta_i = 1, \delta_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

### 3.2 截割电机信号模糊集隶属函数

采煤机截割电机工作参数与煤岩硬度数学关系研究, 分析煤岩阻力、摇臂减速机构的传递效率、截割电机输出转矩, 建立采煤机电机工作参数间接识别煤岩性状截割硬度的数学关系公式<sup>[16]</sup>, 如式(10)所示。

$$f = \frac{K}{10} CK_p \sqrt{3} U_L I_L \left( C = \frac{\eta \cos \varphi}{\omega R_{\text{head}} A} \right) \quad (10)$$

式中  $U_L$  为截割电机线电压;  $I_L$  为截割电机线电流;  $\cos \varphi$  为截割电机功率因素;  $\omega$  为截割电机转速;  $\eta$  为机械传动效率(常数; 已知多级减速机构机械传动参数);  $K_p$  为电机负荷系数(常数; 电机运行时的实际功率和额定功率的比);  $R_{\text{head}}$  为滚筒平均半径;  $f$  为岩石硬度普氏系数;  $K$  为关系公式中修正系数。

确定截割电机因素影响截割硬度因子隶属函数为

$$A_1(u_1) = f = \frac{K}{10} CK_p \sqrt{3} U_L I_L \quad (11)$$

根据煤矿实际采煤机截割煤岩硬度普氏系数经验值, 确定  $f$  的值域为  $(0, 20]$ , 归一化  $A_1(u_1)$  的值域, 如式(12)所示。

$$A_1(u_1) = \frac{1}{20} f = \frac{1}{20} \times \frac{K}{10} CK_p \sqrt{3} U_L I_L \quad (12)$$

### 3.3 振动信号模糊集隶属函数

摇臂振动信号模糊集作为采煤机煤岩性状截割硬度模糊集的子集, 提取振动信号小波包特征向量  $T$ , 容差向量  $\Delta C$  为振动信号检测向量与空载特征向量的特征值,  $C_j$  为已知割岩特征向量(归一化参考向量), 确定摇臂振动信号模糊集隶属函数的归一化函数<sup>[16]</sup>, 如式(13)所示。

$$A_2(u_2) = \left\| \frac{\Delta C}{C_j} \right\| \quad (13)$$

式(13)确定割顶板岩石特征向量为参考向量, 满足  $A_2(u_2)$  的值域为  $[0, 1]$ , 0 为空载, 1 为割顶板岩石。

### 3.4 煤岩性状截割硬度因子隶属度

在样本学习的过程中, 满足  $\sum_{i=1}^n \delta_i = 1, \delta_i (i = 1, 2, \dots, n)$  的条件下, 根据现场工况实际以及专家系统经验值, 可令  $\delta_1 = 0.5, \delta_2 = 0.3, \sum_{i=3}^n \delta_i = 0.2$ , 则有式(14)。

$$A(u) = 0.5 \times \left( \frac{1}{20} f = \frac{1}{20} \times \frac{K}{10} CK_p \sqrt{3} U_L I_L \right) + 0.3 \times \left( \left\| \frac{\Delta C}{C_j} \right\| \right) + \dots \quad (14)$$

初步得到多传感器判别煤岩界面模糊定义隶属函数  $A(u)$ 。以滚筒空载振动特征向量<sup>[16]</sup>  $T = [8.942, 08, 39.188, 48, 19.171, 84, 33.236]$  为参考向量。图2为采煤机滚筒空载振动信号时频域两阶小波包分解特征信号。

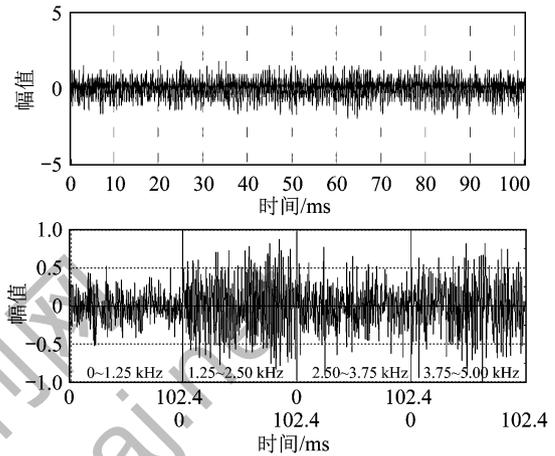


图2 滚筒空载振动信号两阶小波包分解特征信号  
Fig. 2 Vibration signal of roller load of two order wavelet packet decomposition characteristic signal

(1) 测试数据分析(割岩石硬度最大)。

截割电机影响因素的截割硬度隶属函数中, 修正系数<sup>[16]</sup>取  $K = 10 \times 10^{-4}$ , 确定割岩工况下截割电机的左、右截割电机功率峰值之和为  $P = 700 \text{ kW}$ , 代入式(11)推导得  $f = 6.2$ 。

图3为采煤机滚筒割岩振动信号时频域两阶小波包分解特征信号。

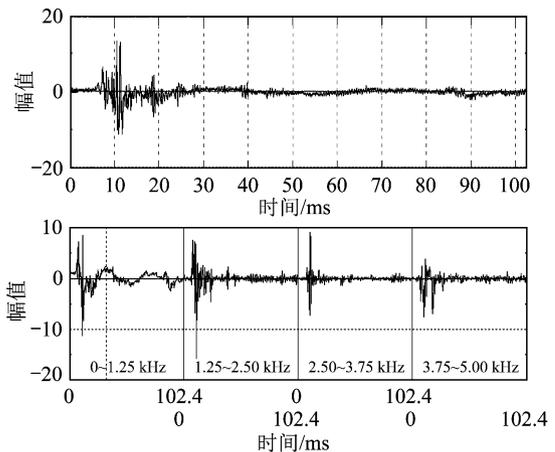


图3 滚筒割岩振动信号两阶小波包分解特征信号  
Fig. 3 Roller cutting rock vibration signal of two order wavelet packet decomposition characteristic signal

取振动信号中割岩工况振动特征向量<sup>[16]</sup>  $T = [755.517\ 44\ 761.085\ 44\ 325.427\ 2\ 378.959\ 36]$  振动特征向量差向量的归一化计算后的模如式(15)所示。

$$\left\| \frac{\Delta C}{C_j} \right\| = 0.960\ 7 \quad (15)$$

根据专家经验将其他传感器信息(摇臂油缸压力等)的影响因素赋予经验值为

$$A(u) = \sum_{i=3}^n \delta_i A_i(u_i) = 0.01 \delta_i (i = 3, 4, \dots, n) \quad (16)$$

式(16)的隶属度计算公式结果为

$$A(u) = 0.5 \times \frac{1}{20} \times 6.2 + 0.3 \times \left\| \frac{\Delta C}{C_j} \right\| + 0.01 = 0.453\ 2 \quad (17)$$

(2) 测试数据分析(割煤)。

截割电机影响因素的截割硬度隶属函数中,修正系数<sup>[16]</sup>取  $K = 10 \times 10^{-4}$ ,确定割煤工况下截割电机的左、右截割电机功率峰值之和  $P = 350\ \text{kW}$ ,代入式(11)推导得  $f = 3$ 。

图4为采煤机滚筒割煤振动信号时频域两阶小波包分解特征信号。

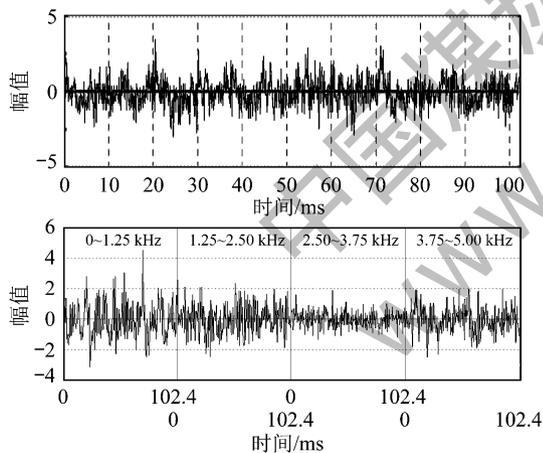


图4 滚筒割煤振动信号两阶小波包分解特征信号

Fig. 4 Drum cutting coal vibration signal of two order wavelet packet decomposition characteristic signal

取振动信号中割煤工况振动特征向量<sup>[16]</sup>  $T = [344.506\ 88\ 221.570\ 56\ 67.381\ 76\ 173.027\ 84]$  振动特征向量差向量的归一化计算后的模如式(18)所示。

$$\left\| \frac{\Delta C}{C_j} \right\| = 0.346\ 2 \quad (18)$$

则隶属度计算公式为

$$A(u) = 0.5 \times \frac{1}{20} \times 3 + 0.3 \times \left\| \frac{\Delta C}{C_j} \right\| +$$

$$0.01 = 0.188\ 9 \quad (19)$$

(3) 测试数据分析(空载)。

截割电机影响因素的截割硬度隶属函数中,修正系数取  $K = 10 \times 10^{-4}$ ,确定空载收煤工况下截割电机的左、右截割电机功率峰值和  $P = 120\ \text{kW}$ ,代入式(11)推导得  $f \approx 0 \sim 1$ 。

取振动信号中空载工况振动特征向量<sup>[16]</sup>  $T = [8.942\ 08\ 39.188\ 48\ 19.171\ 84\ 33.236]$  振动特征向量差向量的归一化计算后的模如式(20)所示。

$$\left\| \frac{\Delta C}{C_j} \right\| \approx 0 \quad (20)$$

虽然理论上不一定为0,但样本数据较少的情况下,在确定工况的数值推理认为0为空载特征数据。

则隶属度计算公式为

$$A(u) \approx 0.5 \times \frac{1}{20} \times 0 + 0.3 \times \left\| \frac{\Delta C}{C_j} \right\| + 0.01 = 0.01 \quad (21)$$

在理论上空载隶属度一般取0或趋近与0。

通过上述研究,在有限的井下测试样本数据分析中,参照岩石普氏系数分级(表1)<sup>[16]</sup>,得到煤岩硬度与截割隶属度对应表格。

表1 截割介质硬度与隶属度<sup>[16]</sup>

Table 1 Cutting medium hardness and membership <sup>[16]</sup>				
工况	空载	较软介质与煤	煤与顶板	顶板
硬度	0	0~3	3~6	6~20
隶属度	0~0.01	0.01~0.188 9	0.188 9~0.453 2	0.453 2~1

## 4 结 论

(1) 提出基于滚筒振动信号和截割电机工作信息等采煤机截割状态信息融合模糊集合方法用于判别煤岩性状截割硬度,解决了单一判据信息不准确、不适应的问题。

(2) 通过计算求解煤岩性状模糊集隶属度  $\mu_Q(u)$  获得表征煤岩性状截割硬度因子  $q$ ,该数值通过煤矿井下采掘工作面测试数据验证了该理论方法在煤层硬度与岩石顶板硬度差异较明显的场合下的适用性。

(3) 提出的采煤机多传感器信息模糊识别煤岩性状的方法在不需要额外检测设备和不影响采煤机正常工作的条件下,能够提供准确的煤岩性状判据,模糊集隶属度的求解值基本满足采煤机实际截割工况的煤、岩硬度普氏系数值,验证了该方法的实时性和准确性。为进一步开展采煤机实时控制提供了基础理论方法。

## 参考文献:

- [1] 葛世荣. 智能化采煤装备的关键技术[J]. 煤炭科学技术 2014, 42(9): 7-11.  
Ge Shirong. Key technology of intelligent coal mining equipment [J]. Coal Science and Technology 2014 42(9): 7-11.
- [2] 汪玉凤, 夏元涛, 王晓晨. 含噪超完备独立分量分析在综放煤岩识别中的应用[J]. 煤炭学报 2011, 36(S1): 203-206.  
Wang Yufeng, Xia Yuantao, Wang Xiaochen. Application on over complete ICA with noise in coal and rock identification of fully mechanized mining [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S1): 203-206.
- [3] 梁义维, 熊诗波. 基于神经网络和 Dempster-Shafer 信息融合的煤岩界面预测[J]. 煤炭学报 2003, 28(1): 86-90.  
Liang Yiwei, Xiong Shibo. Forecast of coal-rock interface based on neural network and Dempster-Shafer theory [J]. Journal of China Coal Society 2003 28(1): 86-90.
- [4] 刘俊利, 赵豪杰, 李长有. 基于采煤机滚筒截割振动特性的煤岩识别方法[J]. 煤炭科学技术 2013, 41(10): 93-95.  
Liu Junli, Zhao Haojie, Li Changyou. Coal-rock recognition method based on cutting vibration features of coal shearer drums [J]. Coal Science and Technology 2013 41(10): 93-95.
- [5] 王增才, 王汝琳, 徐建华, 等. 自然  $\gamma$  射线法在采煤机摇臂自动调高中检测煤层厚度的研究[J]. 煤炭学报 2002, 27(4): 428-429.  
Wang Zengcai, Wang Rulin, Xu Jianhua, et al. Research on coal seam thickness detection by natural Gamma ray in shearer horizon control [J]. Journal of China Coal Society 2002 27(4): 428-429.
- [6] 王增才, 富强. 自然  $\gamma$  射线穿透煤层及支架顶梁衰减规律[J]. 辽宁工程技术大学学报 2006, 25(6): 804-807.  
Wang Zengcai, Fu Qiang. Attenuation of natural  $\gamma$  ray passing through coal seam and hydraulic support [J]. Journal of Liaoning Technical University 2006 25(6): 804-807.
- [7] 王增才, 孟惠荣. 支架顶梁对  $\gamma$  射线方法测量顶煤厚度影响研究[J]. 中国矿业大学学报 2002, 31(3): 323-326.  
Wang Zengcai, Meng Huirong. Influence of canopy of hydraulic support upon measuring thickness of coal seam by natural gamma ray [J]. Journal of China University of Mining & Technology 2002 31(3): 323-326.
- [8] 刘伟, 华臻, 王汝琳. 基于 Hilbert 谱信息熵的煤岩放落振动特征分析[J]. 中国安全科学学报 2011, 21(4): 32-37.  
Liu Wei, Hua Zhen, Wang Rulin. Vibrational feature analysis for coal gangue caving based on information entropy of hilbert spectrum [J]. China Safety Science Journal 2011 21(4): 32-37.
- [9] 张艳丽, 张守祥, 矫林岳, 等. 独立分量分析法在综采煤岩界面识别中的应用[J]. 煤炭科学技术 2007, 35(8): 22-24.  
Zhang Yanli, Zhang Shouxiang, Jiao Linyue, et al. Application on ICA in coal and rock interface identification of the fully mechanized mining [J]. Coal Science and Technology 2007 35(8): 22-24.
- [10] 刘春生, 杨秋, 李春华. 采煤机滚筒记忆程控截割的模糊控制系统仿真[J]. 煤炭学报 2008, 33(7): 822-825.  
Liu Chunsheng, Yang Qiu, Li Chunhua. Simulation of shearer drum cutting with memory program controlling by fuzzy control [J]. Journal of China Coal Society 2008 33(7): 822-825.
- [11] 刘春生, 荆凯, 万丰. 采煤机滚筒记忆程控液压调高系统的仿真[J]. 中国机械工程学报 2007, 5(2): 142-146.  
Liu Chunsheng, Jing Kai, Wan Feng. Simulation of memory programmed hydraulic control system for height adjustment of shearer's drum [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2007 5(2): 142-146.
- [12] 孙继平, 余杰. 基于支持向量机的煤岩图像特征抽取与分类识别[J]. 煤炭学报 2013, 38(S2): 508-512.  
Sun Jiping, She Jie. Coal-rock image feature extraction and recognition based on support vector machine [J]. Journal of China Coal Society 2013 38(S2): 508-512.
- [13] 任芳. 基于多传感器数据融合技术的煤岩界面识别的理论与方法研究[D]. 太原: 太原理工大学 2003.  
Ren Fang. Study on the theory and method of coal-rock interface recognition based on multi-sensor data fusion technique [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology 2003.
- [14] 杨健健, 薛光辉, 吴森, 等. 矿用本安型振动传感器的研制[J]. 煤炭科学技术 2013, 41(2): 71-74.  
Yang Jianjian, Xue Guanghui, Wu Miao, et al. Research and development on mine intrinsic safe mode vibration sensor [J]. Coal Science and Technology 2013 41(2): 71-74.
- [15] 刘送永. 采煤机滚筒截割性能及截割系统动力学研究[D]. 徐州: 中国矿业大学 2009.  
Liu Songyong. Research on cutting performance of shearer drum and cutting system dynamics [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology 2009.
- [16] 杨健健. 采煤机工作状态参数与煤岩硬度影响关系研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京) 2013.  
Yang Jianjian. Research on the affect relationship between shearer working condition parameters and coal-rock hardness [D]. Beijing: China University of Mining and Technology( Beijing) 2013.