

反应式导航在地下自主行驶铲运机中的应用

杨超, 陈树新, 刘立, 罗维东, 孟宇, 冯凯

(北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于“沿墙壁”的反应式导航技术, 设计了铲运机自主导航算法。通过对铰接转向角和油门的控制, 使铲运机车体与墙壁保持一定的安全距离和安全角度自主行驶。根据条形码技术设计了一种可识别的编码信标, 该信标可以有不同的编码组合, 利用激光雷达的扫描和这种编码信标可以实现对若干关键位置(例如起点、采掘点、倾倒点等)的判定, 为导航决策系统提供精确的位置信息以做出行为决策。“沿墙壁”的反应式导航技术结合“信标识别”的关键位置判定技术, 实现了地下铲运机的自主导航行驶。

关键词: 反应式导航; 地下铲运机; 沿墙壁技术; 激光雷达; 编码信标

中图分类号: TD655.3

文献标志码: A

Reactive navigation for underground autonomous scraper

YANG Chao, CHEN Shu-xin, LIU Li, LUO Wei-dong, MENG Yu, FENG Kai

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Using reactive navigation technology based on “wall-following”, autonomous navigation algorithm was designed out. By controlling the articulated angle and throttle, the body of the scraper was kept certain safe distance and angle to the wall of the lane and driven autonomously. A type of barcode beacon was designed using barcode technology; it has different code composition and can be easily recognized. With the help of the scanning of the laser radar and the barcode beacon, certain key locations such as start point, mining point and dumping point can be determined, and those accurate locations were supplied to navigation system to make behavior decision. Using “wall-following” reactive navigation technology and determination of key locations technology with “barcode beacon recognition”, autonomous navigation of the underground scraper was realized.

Key words: reactive navigation; underground scraper; wall-following; laser radar; barcode beacon

铲装设备是地下采矿的最主要设备, 地下铲运机因具有高效、灵活、机动、多用途等突出优点, 成为了高效采矿的首选铲装设备。目前, 无轨采矿技术是地下金属矿山高效采矿技术的发展方向, 而地下铲运机则是无轨采矿的核心装备。

地下铲运机要实现自主行驶, 必须依靠先进的导航技术。国外一些发达国家在地下铲运机的自主导航方面做了很多研究工作。目前主要有绝对式导航和相对式导航两种技术。

绝对式导航技术要求有相对详细的地图信息, 在

限定的坐标系下, 规划好一条限定的路径让铲运机能试图按照这一轨迹来运行^[1-2]。绝对式导航的典型范例就是同时定位和地图创建技术^[3-8] (Simultaneous Localization and Map Building, 简称 SLAM 或者 Concurrent Mapping and Localization, 简称 CML)。相对式导航不需要知道预定的路径, 只是通过主动的感应来感知周围环境的基础设施或者是局部的物体来实现导航。作为相对式导航的一种, 反应式导航技术得到了广泛的应用^[9-15]。

本文基于“沿墙壁”的反应式导航技术, 通过对

收稿日期: 2011-01-19 责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2011AA060408); 国家自然科学基金资助项目(50904007)

作者简介: 杨超(1983—), 男, 山东新泰人, 博士研究生。Tel: 010-62332779, E-mail: superyang999@163.com。联系人: 陈树新(1959—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 副教授。Tel: 010-62332779, E-mail: chen-shuxin@ustb.edu.cn

在关键位置设置的编码信标的检测,对铲运机的行驶给出智能导航策略,实现了其自主导航。目前,这一方法在实验室环境及露天环境下都取得了很好的效果。

1 地下铲运机及其自主导航系统

地下铲运机又叫地下装载机,是专门为地下作业而设计的一种矮车身,中央铰接前端装载的装、运、卸联合作业设备。外形上地下铲运机长、窄、矮,司机室横向布置,前后车体采用中央铰接折腰转向的形式,四轮驱动,可以双向行驶,适应巷道作业。

地下铲运机的行走系统主要由车架组成,其中前、后车架通过上下两个垂直铰销相连,铰接点一般布置在轴距的中点,允许两个车架在水平面内有 40° 左右的相对转角,从而减小地下铲运机的转弯半径,提高整机的稳定性。另外铲运机还装有摆动车架,它可以绕纵向销轴左右摆动,从而使两侧车轮可以横向摆动一定高度,用限位块限制角度为 $\pm 10^\circ$,使得铲运机在不平的路面行驶时,保证两侧车轮可以同时接触地面,改善车轮的附着条件。

地下铲运机的转向系统大都采用铰接液压转向机构,转向机构主要由 4 部分组成:转向油缸(有单缸和双缸之分)、操纵机构(有方向盘与全液压转向器、单杆操纵与转向阀之分)、上下铰接体、液压系统。

本文研究的地下铲运机实车(图 1)的转向油缸采用单缸,操纵机构采用单杆操纵与转向阀的形式;实验室用模拟样机(图 2)按照一定比例缩放,其结构跟实车一样,为了在实验室环境下完成导航定位等算法和功能的验证。

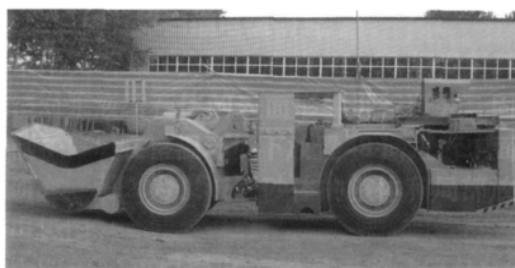


图 1 地下铲运机及其实验环境

Fig. 1 Underground scraper and its experiment environment

地下铲运机自主导航系统主要由信息采集系统、导航决策系统和运动控制系统 3 部分组成,其结构如图 3 所示。

信息采集系统通过对激光雷达、里程计、角位移传感器、陀螺仪等车载传感器的信息的采集,得到铲运机的位姿信息(包括航向角、铰接角以及行驶距离信息等),并通过 CAN 总线传递给导航决策系统;导

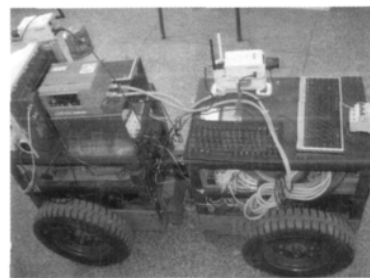


图 2 地下铲运机模拟样机

Fig. 2 Underground scraper prototype

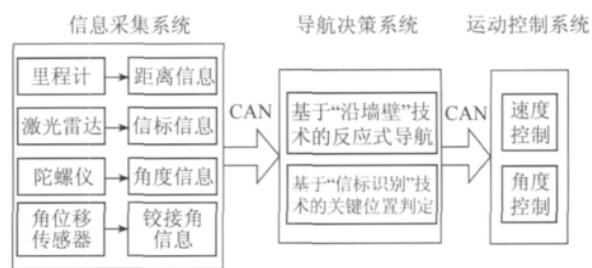


图 3 自主导航系统体系结构

Fig. 3 Structure of the autonomous navigation system

航决策系统是铲运机实现自主导航的关键,主要由基于“沿墙壁”技术的反应式导航和基于“信标识别”的关键位置判定两项关键技术组成;运动控制系统负责控制执行器器件的动作,以实现速度和角度的控制。本文主要阐述导航决策系统的相关技术。

2 基于“沿墙壁”技术的反应式导航

2.1 概述

所谓基于“沿墙壁”技术的反应式导航是指:铲运机通过信息采集系统(激光雷达等车载传感器)主动感知巷道环境(主要是车体侧面墙壁以及前方可行区域),判断自身的位置,并通过与侧面墙壁保持一定的安全距离和安全角度来完成自主导航。

信息采集系统的车载传感器的安装位置如图 4 所示,其中激光雷达安装在铲运机前后车体的前方和侧方,用以感知巷道环境;陀螺仪用以测量航向角;里程计(即转速传感器)用以测量行驶距离。

其中,前后向激光雷达的扫描范围设为 180° ,扫描频率 75 Hz,分辨率 1° ,可检测的距离范围 0 ~ 80 m,主要作用是实现前方可行区域的探测;侧向激光雷达的扫描范围设为 30° ,扫描频率 300 Hz,分辨率 0.2° ,可检测的距离范围 0.7 ~ 3.0 m,主要作用是检测铲运机车体与墙壁的距离以及航向角的推算。

实验室环境下,采用楼道模拟巷道环境,楼道墙壁是平直的,此种环境下,所采用的“沿墙壁”的反应式导航感知的是平直的墙壁;井下实际环境中巷道壁

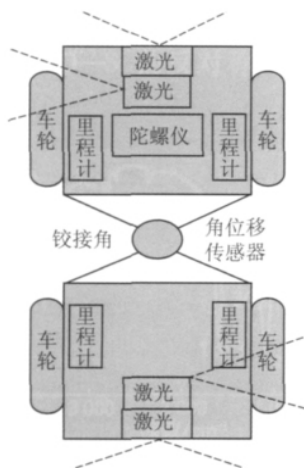


图 4 信息采集系统传感器位置布置

Fig. 4 Layout of the sensors of the information collection system 是弯曲的,为此采用微分的思想,将整个弯曲的巷道壁分解为若干段平直的巷道壁来进行处理应用。

2.2 航向角、车体与墙壁距离的计算

在铲运机行驶过程中某一时刻,其车体姿态如图 5 所示(以前车体为例说明)。

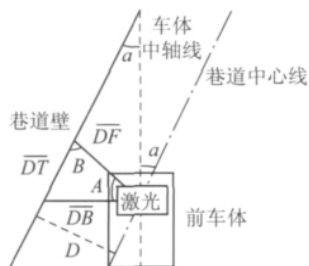


图 5 铲运机前车体行驶过程位置示意

Fig. 5 Location of the scraper's front part on the travel

2.2.1 航向角 a 的计算

如图 5 所示,航向角 a (即车体中轴线与墙壁夹角 a) 是铲运机行进中的重要参数。理想情况下,需要实时控制 $a = 0$,才能保证铲运机与巷道壁平行运行。

其计算方法如下:

(1) 根据激光雷达扫描的数据,得到扫描角度为 30° 时的距离 \overline{DF} 和 0° 度时的距离 \overline{DB} ;

(2) 根据已知角度差和 \overline{DF} 、 \overline{DB} ,利用三角函数公式得到临时中间参数 \overline{DT}

$$\overline{DT} = \sqrt{\overline{DF}^2 + \overline{DB}^2 - 2 \overline{DF} \overline{DB} \cos A} \quad (1)$$

(3) 根据反三角函数公式,可以推算出航向角 a

$$a = \arccos\left(\frac{\overline{DF}^2 + \overline{DT}^2 - \overline{DB}^2}{2 \overline{DF} \overline{DT}}\right) - (90^\circ - A) \quad (2)$$

2.2.2 车体与墙壁距离 D 的计算

如图 5 所示,车体中心与墙壁距离 D 也是铲运机行进中的重要参数。理想情况下,需要实时控制 D 为安全距离,才能保证铲运机平稳运行而不与巷道壁发生碰撞。

其计算方法如下:

(1) 由单个扫描点的数据计算出车体中心与巷道壁的垂直距离

$$D_i = L_i \sin(a_0 + a + i\Delta a) \quad (i = 0, 1, \dots, n) \quad (3)$$

(2) n 组数据加权求平均

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n D_i \quad (4)$$

其中, a_0 为激光雷达扫描起始角; Δa 为角分辨率; L_i 为每个扫描点的测量距离。

根据理论研究,影响车速的两个主要因素是航向角和车体中心与巷道壁的距离。因此,车速的控制是由 a 和 D 两个变量的函数确定的。转角的控制与车速有关,归根到底也是受 a 和 D 两个变量的影响,因此结合实验,得出

$$\text{SetSpeed} = f(a, D) \quad (5)$$

$$\text{SetAngle} = g(\text{SetSpeed}) = g(a, D) \quad (6)$$

在铲运机自主导航行驶过程中,运动控制系统就根据这两个设定值进行角度和速度的控制从而实现其安全平稳地行驶。

3 基于“信标识别”技术的关键位置判定

3.1 “信标识别”的基础——条形码技术

条形码技术,是一种自动识别技术,集条码理论、光电技术、计算机技术、通信技术、条码印制技术于一体,具有准确、快速、经济、便于操作等特点。

条形码是由宽窄不同、反射率不同的“条”和“空”,按照一定的编码规则组合起来的一种信息符号。利用条码扫描器将接受到的“条”、“空”的不同的反射光信号,经过光电转换器转换成模拟电信号,然后经过整形变成通常的数字信号。根据码制所对应的编码规则,译码器便可以将数字信号识读译成数字、字符信息^[16]。条码的扫描信号如图 6 所示。

3.2 编码信标的识别算法

利用激光雷达在其扫描范围内所扫描返回的信息(扫描角度 30° ,扫描频率 300 Hz,角分辨率 0.2° ,也就是说一个完整的扫描周期返回 150 个扫描点的数值,这些数值中包含了需要的距离信息),对于信标进行识别。其扫描示意如图 8 所示。

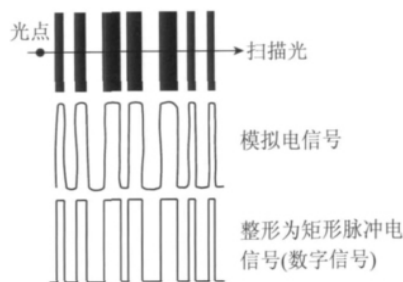


图 6 条码的扫描信号示意

Fig. 6 Sketch map of the scanning signal

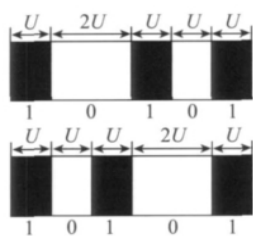


图 7 两种不同组合编码信标示意

Fig. 7 Sketch map of the two different barcode beacons

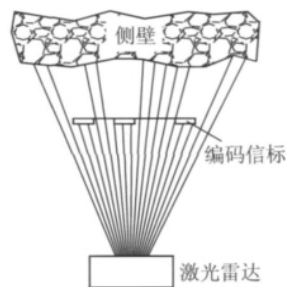


图 8 激光雷达扫描示意图

Fig. 8 Sketch map of the scanning of the laser radar

信标识别过程如下:

(1) 识别特征点。提取所有测量得到的扫描点的距离值 $Data_P[i].Dis$ 并计算相邻点的差值,即

$$L_1 = \text{abs}(Data_P[i+1].Dis - Data_P[i].Dis) \quad (7)$$

如果 $L_1 > \delta_1$ (δ_1 为设定的可分辨阈值), 则将此点作为特征点记录下来, 即将 i 存入 $C[j++]$ 。

(2) 扫描点的二值化。利用特征点前后相邻两个扫描点间的差值来区分两类扫描点, 令

$$L_2 = Data_P[C[j]+1].Dis - Data_P[C[j]].Dis \quad (8)$$

式中, $Data_P[C[j]+1].Dis$, $Data_P[C[j]].Dis$ 分别为特征点前后两个扫描点的距离。

如果 $L_2 > \delta_2$ (δ_2 为设定的可分辨阈值), 则 $Data_P[i].Flag = 1$; 反之则 $Data_P[i].Flag = 0$ 。

(3) 特征点的归类。特征点将信标分为若干段, 段的标志取自相应特征点的标志, 即

$$Data[j_1].Flag = Data_P[C[j_1]+1].Flag \quad (9)$$

式中, $Data[j_1].Flag$ 为段的标志; $Data_P[C[j_1]+1].Flag$ 则为相应的特征点的标志。

(4) 计算距离。利用几何关系计算出各段的距离, 存入 $Data[j_1].Len$ 。

(5) 标志位与模板标志的匹配。判断识别到的编码各段标志位 $Data[j_1].Flag = \{1\ 0\ 1\ 0\ 1\}$ 是否与模板的标志位 $\{1\ 0\ 1\ 0\ 1\}$ 一致, 如果一致则进行下一步计算。

(6) 距离的匹配计算。

$$v_1 = \sum_{j_1=0}^4 (Data[j_1] - m_1[j_1])^2 \quad (10)$$

$$v_2 = \sum_{j_1=0}^4 (Data[j_1] - m_2[j_1])^2 \quad (11)$$

其中, $m_1[j_1]$, $m_2[j_1]$ 为两个信标模板的各段的距离; v_1 , v_2 分别为与这两个模板距离的方差。如果在允许的方差范围就认为与相应的模板匹配。

(7) 识别结束, 辨别出相应信标。

编码信标识别子程序流程如图 9 所示。

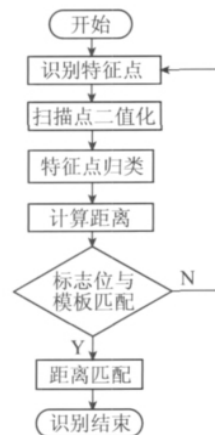


图 9 编码信标识别子程序流程

Fig. 9 Flow chart of the barcode beacon identification

3.3 关键位置的判定

图 10 为地下铲运机的典型工作区域, 在工作区段的起点、采掘点、倾倒地等关键位置设置不同的编码信标, 通过信标的识别来确定铲运机所处的位置, 从而实现对关键位置的判定。

铲运机自主导航的实现就是依靠基于“沿墙壁”的反应式导航算法结合基于“信标识别”的关键位置判定算法来实现的。

在行驶过程中, 通过运动控制系统控制速度和转向角度, 使得铲运机车体始终与墙壁保持安全距离 (一般设定为巷道宽度的一半) 和安全角度 (一般设定为与巷道壁平行的角度, 即航向角为 0), 当行驶到关键位置时 (如图 10 所示采掘点或者倾倒地), 通过对相应位置的编码信标的检测, 判定铲运机所处的位

置,并通过导航决策系统给出此时铲运机应该有的行驶行为(如转向、直行或停止等),从而实现其自主导航。

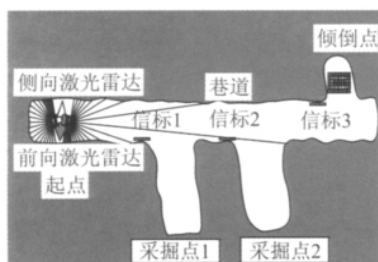


图 10 地下铲运机典型工作区段及信标布置

Fig. 10 Sketch map of the underground scraper's working section and beacon's locations

4 实验验证

4.1 实验室环境下铲运机模拟样机自主导航实验

实验室环境采用楼道模拟井下巷道,在这种情况下基于上述算法实现铲运机模拟样机的正反向自主导航实验。实验环境如图 11 所示,实验过程视频截图如图 12 所示。

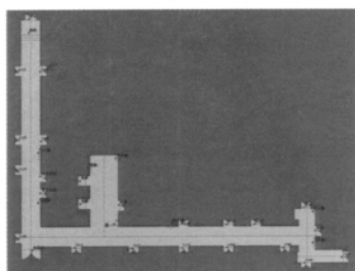


图 11 实验室模拟环境示意

Fig. 11 Sketch map of the indoor environment



图 12 实验过程视频截图

Fig. 12 Screenshot of the experiment on the simulation prototype of the scraper

4.2 露天环境下铲运机实车自主导航实验

针对井下巷道壁凹凸不平的特点,以油布为道具,设计了一条带转弯的“随风摆动”巷道,用以模拟井下凹凸不平的墙壁,同时在关键位置放置了导航所需的信标。在搭建好的巷道内进行铲运机的正反向自主导航实验。铲运机正向自主行驶到终点并停止,然后反方向行驶回到起点,完成一个来回作业循环,模拟从铲装点到卸载点的工作过程,经过实验,完成了铲运机从起点到终点再回到起点的全过程自主导航。

实验用铲运机及其实验环境如图 1 所示,露天环境下的实验模拟环境如图 13 所示。

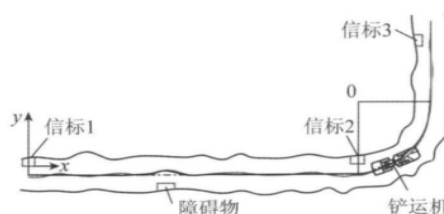


图 13 露天环境下实验环境示意

Fig. 13 Sketch map of the outdoor environment

5 结 论

设计了一种基于“沿墙壁”的反应式导航技术与基于“信标识别”的关键位置判定技术相结合的地下铲运机自主导航系统,该系统可以实现地下铲运机在无人操作情况下的自主导航行驶,经过实验室环境以及露天环境的重复性试验验证,此系统能够比较稳定地实现铲运机模拟样机以及实车的自主导航行驶。

参考文献:

- [1] Ishimoto H, Amd T T, Sarata S, et al. A practical trajectory following of an articulated steering type vehicle [A]. International Conference on Field and Service Robotics [C]. Canberra, Australia, 1997: 412 - 419.
- [2] Hemami A, Polotski V. Path tracking control problem formulation of an LHD loader [J]. The International Journal of Robotics Research, 1998, 17: 193 - 199.
- [3] Thrun S, Bennewitz M, Burgard W, et al. Minerva: a second-generation museum tour-guide robot [A]. IEEE Conference on Robotics and Automation [C]. Detroit, USA, 1999: 1 999 - 2 005.
- [4] Thrun S, Burgard W, Fox D. A real-time algorithm for mobile robot mapping with applications to multi-robot and 3d mapping [A]. IEEE Conference on Robotics and Automation [C]. San Francisco, USA, 2000: 321 - 328.
- [5] Guivant J E, Masson F R, Nebot E M. Simultaneous localization and map building using natural features and absolute information [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2002, 40(2 - 3): 79 - 90.
- [6] Newman P. On the structure and solution of the simultaneous locali-

- zation and map building problem [D]. Sydney: The University of Sydney, 1999.
- [7] 厉茂海,洪炳镭. 移动机器人同时定位和地图创建的一种新方法[J]. 南京理工大学学报, 2006, 30(3): 302-305.
- Li Maohai, Hong Bingrong. Novel method of mobile robot simultaneous localization and mapping [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2006, 30(3): 302-305.
- [8] 庄严,王 伟,王 珂,等. 移动机器人基于激光测距和单目视觉的室内同时定位和地图构建[J]. 自动化学报, 2005, 31(6): 925-933.
- Zhuang Yan, Wang Wei, Wang Ke, et al. Mobile robot indoor simultaneous localization and mapping using laser ranger finder and monocular vision [J]. Acta Automatica Sinica, 2005, 31(6): 925-933.
- [9] Eriksson G, Kitok A. Automatic loading and dumping using vehicle guidance in a Swedish mine [A]. Proceedings of the First International Symposium on Mine Mechanization and Automation, Mining Magazine [C]. Golden: Colorado, U S A, 1992: 1 533-1 540.
- [10] Brophy G, Euler D. The opti-trak system, a system for automating today's LHDs and trucks [J]. CIM Bulletin, 1994, 87: 52-57.
- [11] Piche A, Gaultier P. Mining automation technology - The first frontier [J]. CIM Bulletin: 1996, 89: 51-54.
- [12] Lane J D. Automatic steering system for an underground mine haul truck [D]. Golden: Colorado School of Mines, 1992.
- [13] Steele J P H, King R, Strickland W. Modeling and sensor-based control of an autonomous mining machine [A]. International Symposium on Mine Mechanisation and Automation [C]. 1991: 655-667.
- [14] Ruff T M. Ultrasonic guidance and remote control of a compact loader [A]. International Symposium on Mine Mechanization and Automation [C]. 1991: 645-654.
- [15] Elliot S Duff, Jonathan M Roberts, Peter I Corke. Automation of an underground mining vehicle using reactive navigation and opportunistic localization [A]. Proc. 2002 Australasian Conference on Robotics and Automation [C]. 2002: 151-156.
- [16] 陈丹晖,刘 红. 条码技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- Chen Danhui, Liu Hong. Bar code technology and applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.

2012 年《煤炭学报》征订启事

《煤炭学报》是中国煤炭学会主办的、向国内外发行的煤炭科学技术方面的综合性学术刊物。主要刊载煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护等方面的科学研究成果论著和学术论文,以及煤矿生产建设、企业管理经验的理论总结,也刊载重要学术问题的讨论及国内外煤炭科学技术方面的学术活动简讯。

《煤炭学报》刊载的论文具有较高的学术价值和文献收藏价值,被 Ei、IEA Coal Abstract CD-ROM、中国科学引文数据库、科学技术文摘速报(日本)、Coal Highlights、中国学术期刊文摘等国内外 20 多种重要文摘检索系统所收录。1992 年荣获首届全国优秀科技期刊评比二等奖,获中国科学技术协会优秀学术期刊二等奖,获北京市新闻出版局、北京市科学技术期刊编辑学会全优期刊奖。1996 年荣获第二届全国优秀科技期刊评比一等奖,获中国科学技术协会优秀科技期刊一等奖。1999 年荣获首届国家期刊奖。2004, 2007, 2010 年分别入选第三、第六和第九届百种中国杰出学术期刊。2008 年荣获“中国精品科技期刊”称号。2009 年荣获“新中国 60 年有影响力的期刊”称号。

《煤炭学报》深受广大作者、读者的爱护和支持,也受到各级部门的重视,在学术水平上具有较高的地位,很多单位都将在《煤炭学报》发表的论文作为作者学术水平考核指标之一。

《煤炭学报》为月刊,每期 176 页,每册订价 58 元,全年共收费 696 元。欲订阅者可直接与本编辑部联系,编辑部随时办理订阅手续。

本刊地址:北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部 邮政编码:100013

联系电话:(010) 84262930 联系人:毕永华

E-mail: mtxbbyh@126.com