

葛世荣 苏忠水 李 昂 等. 基于地理信息系统(GIS)的采煤机定位定姿技术研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2503-2508. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.7011
Ge Shirong Su Zhongshui Li Ang et al. Study on the positioning and orientation of a shearer based on geographic information system[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2503-2508. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.7011

基于地理信息系统(GIS)的采煤机定位定姿技术研究

葛世荣¹ 苏忠水² 李 昂¹ 王世博¹ 郝尚清¹ 刘万里¹ 孟 磊³

(1. 中国矿业大学 机电工程学院 江苏 徐州 221116; 2. 石家庄博欧金属制品有限公司 河北 石家庄 050061; 3. 中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心 江苏 徐州 221008)

摘 要: 采煤机自主定位及其对煤层信息的感知是采煤机自动控制系统关键技术。以山西某煤矿18201工作面为试验地点,利用震波CT探测技术对工作面煤层进行了精细勘探,构建了工作面煤层地理信息系统。以具有自动寻北功能的惯性导航装置、轴编码器为传感元件,开发了基于工作面地理信息系统的采煤机定位定姿装置。经过工作面试验,采煤机定位装置可实时测量采煤机行走轨迹、截割轨迹及其与煤层顶底板关系,实现了采煤机在工作面煤层三维地质环境中的定位与煤层地质信息的感知。

关键词: 采煤机; 定位定姿; 地理信息系统; 长壁综采工作面

中图分类号: TD421.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2015)11-2503-06

Study on the positioning and orientation of a shearer based on geographic information system

GE Shi-rong¹, SU Zhong-shui², LI Ang¹, WANG Shi-bo¹, HAO Shang-qing¹, LIU Wan-li¹, MENG Lei³

(1. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Shijiazhuang Boou Metal Process Company, Shijiazhuang 050061, China; 3. Internet of Things (Mine Perception) Research Center, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Autonomous positioning and sensing coal seam are the key technologies of an auto-control system of a shearer. No. 18201 longwall face at a coal mine in Shanxi, China was selected as an experimental face. Seismic wave CT was used to detect the coal seam precisely. A geographic information system of the longwall face was built. A positioning and orientation system of shearer was developed with an inertial navigation device and axial encoders. Through some experiments in the longwall face, the positioning and orientation system measured the running tracks and cutting tracks of the shearer. The relationship between these tracks and the roof and floor of the coal seam was obtained. The shearer was located in its working face so that it can sense the coal seam.

Key words: shearer; positioning and orientation; GIS; longwall face

以采煤机、刮板输送机、液压支架为主要设备的长壁综采工作面采煤方法是世界主要产煤国家采用的采煤方法。随着煤炭开采规模与深度的增大,煤矿综采工作面事故频发,采区矿工生命安全受到极大威胁。因此少人、无人的自动化采矿技术是国际煤炭开采领域共同迫切的前沿技术^[1-2]。澳大利亚联邦科

学与工业研究组织^[1-5]、欧洲委员会信息与欧盟委员会^[6]、美国JOY公司^[7]、国内神东煤炭集团^[8]、冀中能源^[9]、西山煤电^[10]等大型煤炭企业相继在长壁综采工作面自动化、智能化研究与工业性试验方面开展了大量的工作。实现自动化、智能化工作面的关键技术是研究适合且能感知煤层条件的采煤机自动控制

收稿日期: 2015-07-27 责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2014CB046301); 国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2013AA06A411); 2014年度山西省煤基重点科技攻关资助项目(MJ2014-05)

作者简介: 葛世荣(1963—),男,浙江天台人,教授,博士。E-mail: gesr@cumt.edu.cn

系统,包括采煤机自主定位与自动导航系统以及自动调高系统,其中采煤机高速、精确自主定位导航技术是实现采煤机自动控制系统的核心^[11-13]。

目前采煤机定位技术主要包括 3 种: ① 以支架为参考基准的定位技术。通过在支架上安装红外传感器^[14]、无线传感网络^[15-16],采煤机信号发射装置发出的信号经支架接收装置接收,根据接收信号的支架编号和支架对应位置坐标进行定位。这种定位技术的定位精度主要与信号接收装置的布置密度有关,而且,由于此定位法基于已知的支架坐标信息,在实际的生产过程中,工作面支架移架频繁,位置不能实时获取,所以无法实现实时与精确定位。② 轨道里程定位技术。通过采煤机行走齿轮传感器监测采煤机在刮板上的运行距离,采煤机的行走距离按照齿轨与齿轨啮合的圆周计算^[17]。该方法只能确定采煤机沿刮板输送机的运动距离和方向,无法确定采煤机在工作面方向与推进方向上的位移,造成定位不精确,同时存在齿轮计数误差累加的不足。因此,该定位技术仅能大体判断采煤机的位置,无法满足采煤机定位的精度和实时性要求。③ 自主定位技术。将捷联式惯性导航系统应用于井下采煤机的自主定位技术,其原理是将捷联惯导直接固联在采煤机机身,捷联式惯性系统中的陀螺仪和加速度计直接感受采煤机在惯性空间的转动角速度和线性加速度,经过积分运算得到采煤机机身的运动速度、航向、姿态和位置等信息^[2-3, 5, 18-19]。文献[20]提出了基于陀螺仪和里程计的综合定位方法,利用光纤陀螺仪测量采煤机的航向角,将里程计测得的速度利用航位推算方法获得采煤机的位置。这种定位方法解决了捷联惯导系统以线加速度积分测量采煤机速度造成的积分累积误差问题,但在航向角度上仍然存在积分累积误差。

采煤机与工作面煤岩相互作用,采煤机定位定姿技术必须获得煤岩截割过程中采煤机在煤层中的三维绝对位置及其姿态。缺少采煤机在煤层中的确定位置信息,是阻碍长壁综采工作面自动化作业可靠稳定的重要原因。例如基于记忆截割的采煤机自动调高是自动化工作面经常使用的技术,它在复杂地质条件下应用受到了限制(图 1)。通过采煤机在煤层的位置信息,不但可以获得当前截割过程的煤层顶底板信息,而且可以预知后续截割煤层的地质变化,为采煤机自动调高提供信息。因此,采煤机定位定姿技术必须研究以采区绝对坐标为参考坐标,获得采煤机在开采煤层内位置的方法与技术。笔者依托承担的“973”计划课题“深部煤岩自适应高效截割原理与适用性评估”、“863”计划课题“采煤机工作可靠性智能

监测技术”、“十二五”智能制造装备发展专项“煤炭综采成套设备智能系统开发与示范应用”项目,以山西某煤矿 18201 工作面为试验地点,研究了基于工作面地理信息系统(GIS)的采煤机绝对定位技术,实现采煤机在工作面煤层三维地质环境中的定位与煤层地质信息的感知,为实现采煤机根据地质条件的自动调高提供了有力支撑。

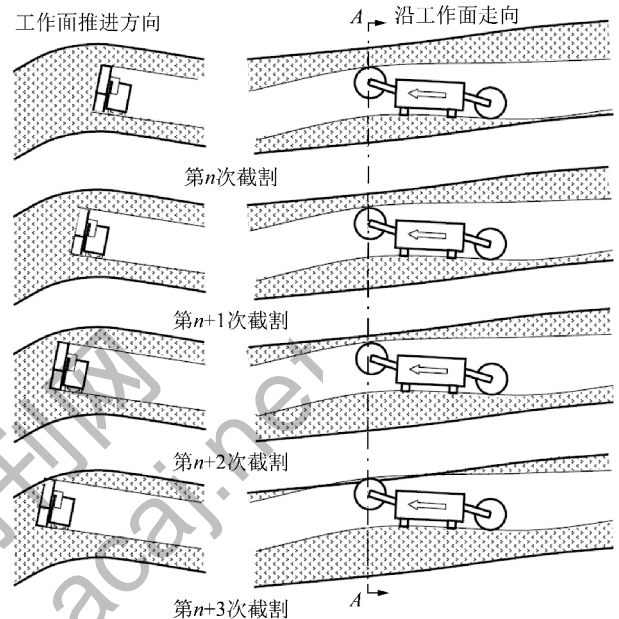


图 1 记忆截割在褶皱煤层的应用局限^[22]

Fig. 1 Limitation of memory cutting in fold geometry^[22]

1 工作面地理信息系统(GIS)的构建

为了建立工作面精细地质模型,利用震波 CT (Computerized Tomography) 探测技术对 18201 工作面煤层进行了地质探测。被勘探工作面基本参数为:工作面长度 291.1 m,沿东方向;走向长度 6 112.5 m,沿北方向,煤层倾角 $8.1^{\circ} \sim 11.1^{\circ}$,煤层厚度变化范围 3.95 ~ 8.04 m,平均煤层厚度 5.57 m。图 2 为震波 CT 探测技术方案原理^[17],激发点测线布置于胶带巷,测线总长约 4 150 m,实际炮间距均为 10 m,施工炮点

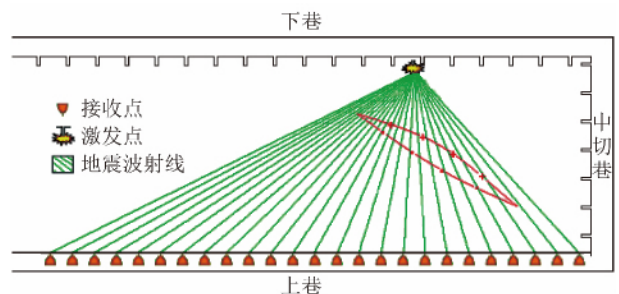


图 2 工作面震波 CT 探测技术方案原理^[17]

Fig. 2 Principle of the detection of a longwall face with seismic wave CT^[17]

415 个。接收测线布置于材料巷, 测线总长约 4 300 m, 实际道间距 10 m, 接收机 430 个, 现场共布置 8 站。探测数据处理采用 2.5 m×2.5 m 网格单元的划分, 反演区域 4 320 m×292.5 m。利用地质资料和震波 CT 探测

数据, 在 ArcGIS 平台下建立了以开采起始点为原点的东北天坐标系下的工作面煤层顶底板数字模型(图 3)。顶底板数据以栅格点坐标值形式存储, 栅格尺寸为 0.8 m, 栅格行列数分别为 5 391 行和 365 列。

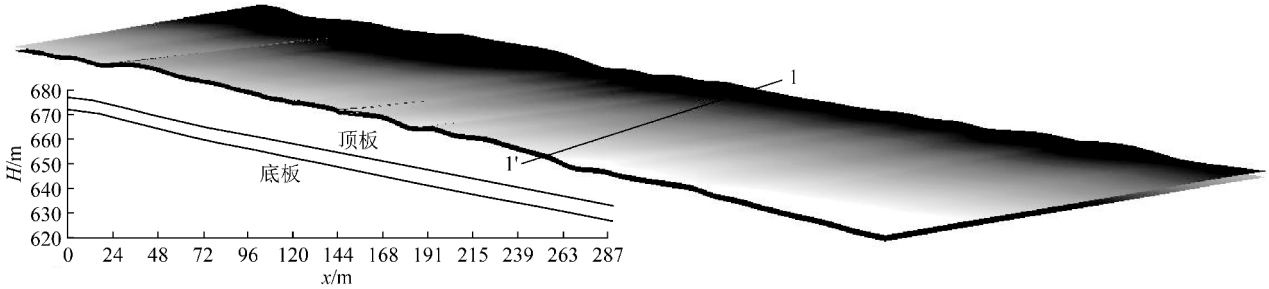


图 3 18201 工作面煤层及煤层顶底板三维模型^[17]

Fig. 3 Three dimensional model of coal seam and its roof and floor^[17]

2 采煤机定位定姿算法与技术实现

2.1 采煤机定位定姿算法

基于 GIS 的采煤机定位定姿的目标是将采煤机定位到工作面煤层中, 确定采煤机及其截割滚筒与工作面煤层顶底板的位置关系。为了与工作面煤层数据库匹配, 采煤机定位坐标系与工作面煤层数据库坐标系使用同一坐标系, 即以开采起始点为原点的东北天坐标系。因此采煤机定位定姿算法要实时解算出采煤机机身、截割滚筒在“东北天”坐标系下的坐标。

图 4 为采煤机定位定姿技术方案, 利用安装于采

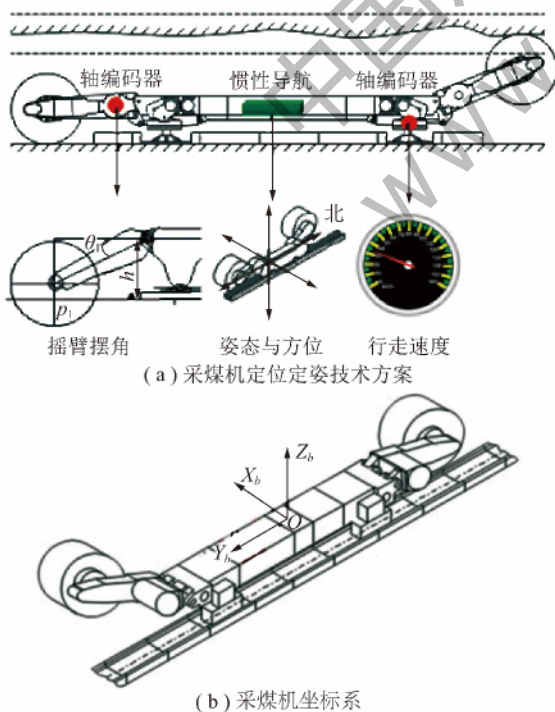


图 4 采煤机定位定姿技术方案与采煤机坐标系

Fig. 4 Positioning and orientation and the coordinate frame of a shearer

煤机机身的具有自动寻北功能的惯性导航装置测量采煤机机身的运行方位与姿态, 利用安装于摇臂与机身铰接轴的轴编码器测量摇臂相对于采煤机机身的旋转角度, 利用安装于采煤机行走部的轴编码器测量采煤机的行走速度与距离(标量, 行走方向由惯性导航装置确定)。采煤机定位定姿算法主要流程如图 5 所示。

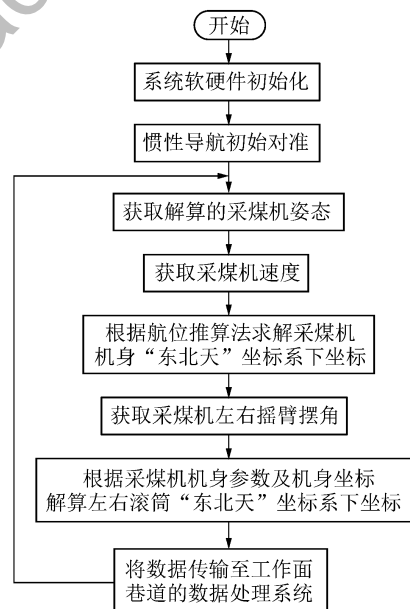


图 5 采煤机定位定姿算法主要流程

Fig. 5 Basic flows of shearer positioning and orientation algorithm

根据航位推算原理^[18] 采煤机定位基本方程为

$$S_n = C_b^n \times S_b \quad (1)$$

其中 S_b 为行走部轴编码器实时测得的单位时间内采煤机在采煤机坐标系下位移增量; S_n 为采煤机在东北天坐标系下的位移增量矢量; C_b^n 为采煤机坐标系到东北天坐标系的方向余弦矩阵, 其表达式^[21] 为

$$C_b^n = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \varphi & \sin \theta \sin \gamma \cos \varphi + \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \sin \gamma \cos \varphi - \sin \theta \sin \varphi \\ -\cos \gamma \sin \varphi & -\sin \theta \sin \gamma \sin \varphi + \cos \theta \cos \varphi & -\cos \theta \sin \gamma \sin \varphi - \sin \theta \cos \varphi \\ -\sin \gamma & \sin \theta \cos \gamma & \cos \theta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 φ θ γ 分别为由惯性导航装置测量的采煤机航向角、俯仰角和横滚角。采煤机机身在“东北天”坐标系下的位置可表示为

$$P_{nj}(t) = P_{nj}(t-1) + S_n(t) \quad (3)$$

式中 $P_{nj}(t)$ $P_{nj}(t-1)$ 分别为采煤机 t 和 $t-1$ 采样时刻在东北天坐标系下的位置; $S_n(t)$ 为采样周期内采煤机在东北天坐标系下的位移增量矢量。

采煤机左、右滚筒回转中心点 D_L^b D_R^b 在采煤机坐标下坐标可表示为

$$D_L^b = \begin{bmatrix} B \\ L \cos \alpha_L + l/2 \\ L \sin \alpha_L \end{bmatrix} \quad D_R^b = \begin{bmatrix} B \\ -L \cos \alpha_R - l/2 \\ L \sin \alpha_R \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 B 为采煤机滚筒与采煤机机体之间的中心距; l 为采煤机机体的长度; L 为摇臂的长度; 下标 L, R 分别代表采煤机的左、右截割滚筒; 上标 b 表示采煤机坐标系; α_L α_R 分别为采煤机左、右摇臂摆角。

根据采煤机坐标系与东北天坐标系之间的转换关系, 可得采煤机滚筒回转中心点在东北天坐标系下坐标可表示为

$$D_i^n(t) = P_{nj}(t) + C_b^n \times \begin{bmatrix} B \\ L \cos \alpha_L + l/2 \\ L \sin \alpha_L \end{bmatrix}$$

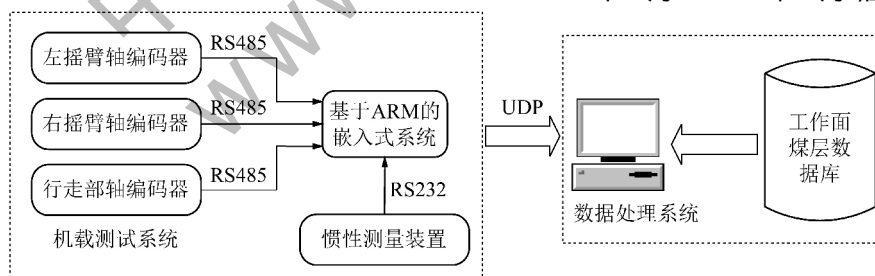


图6 基于GIS的采煤机定位定姿技术实施方案

Fig. 6 Implementation plan of shearer positioning and orientation technology based on GIS

工作面对该装置进行了安装调试与工业性试验。工作面对应的采煤机机身长度 9 820 mm, 摇臂长度 3 535 mm, 滚筒直径 3 000 mm。利用该装置, 完整的测量了采煤机截割过程中采煤机运行轨迹以及采煤机截割轨迹, 并对比分析了采煤机运行轨迹、截割轨迹与工作面顶底板的三维位置关系。图 8 为工作面推进方向 905 m 处采煤机人工控制下连续截割 6 刀时采煤机的运行轨迹与滚筒截割轨迹, 通过对采煤机运行轨迹分析发现, 采煤机往返行程为 281.98 m, 采

$$D_2^n(t) = P_{nj}(t) + C_b^n \times \begin{bmatrix} B \\ -L \cos \alpha_R - l/2 \\ L \sin \alpha_R \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据矢量 $P_{nj}(t)$ 点 $D_L^b(t)$ $D_R^b(t)$ 即可绘制出东北天坐标下不同时刻的采煤机运动、前后滚筒截割位置点坐标。

2.2 采煤机定位定姿硬件组成

图 6 为基于 GIS 的采煤机定位定姿技术实施方案。轴编码器为绝对值多圈轴编码器, 输出信号为 RS485, 单圈分辨率 12 位, 连续圈数 4 096 圈, 通讯协议波特率 4 800 ~ 115 200 bit/s, 刷新周期约为 1.5 ms。惯性测量装置航向角精度 0.05° , 俯仰角与翻滚角测量精度 0.01° , 输出信号为 RS232。基于 ARM 的嵌入式系统分别读取 3 个轴编码器和惯性测量装置的输出数据, 根据式 (3) 和 (5) 实时计算出“东北天”坐标系下的采煤机运行轨迹、滚筒截割轨迹。然后通过 UDP 通讯传输至位于工作面巷道的数据处理系统。数据处理系统把各轨迹数据点与工作面煤层顶底板数据在“东北天”坐标系下进行融合, 获得采煤机在工作面煤层的位置。图 7 为采煤机定位定姿装置实物照片及其在采煤机上的安装。

3 实验室试验与工业性试验

2013 年 9 月—2014 年 8 月, 在山西某煤矿 18201

煤机往返行程为采煤机中心点往返行程, 与工作面长度 291.1 m 的差值为 9.12 m, 差值与采煤机机身长度 9.82 m 基本一致; 采煤机运行倾斜角度 11.06° , 与工作面参数基本一致。

根据采煤机运行位置, 在工作面煤层数据库中读取运行位置处工作面煤层的顶底板数据, 并在“东北天”坐标系下同时绘制, 即可得到采煤机运行轨迹、截割轨迹与工作面顶底板的三维位置关系, 如图 9 所示。截割轨迹与 GIS 顶底板曲线的误差平均差值分



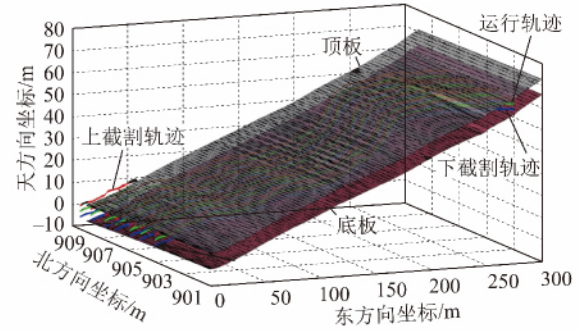
(a) 采煤机定位定姿装置



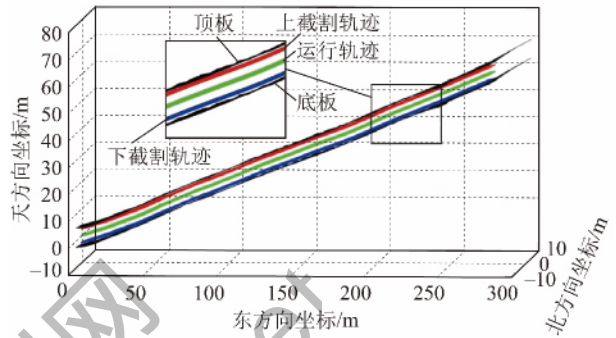
(b) 采煤机定位定姿装置在采煤机的安装

图 7 采煤机定位定姿装置及其在采煤机的安装

Fig. 7 Positioning and orientation system and its application in a shearer



(a)



(b)

图 9 采煤机运行轨迹、截割轨迹与工作面顶底板关系

Fig. 9 Relation between running tracks and cutting tracks of a shearer and the roof and floor of the coal seam

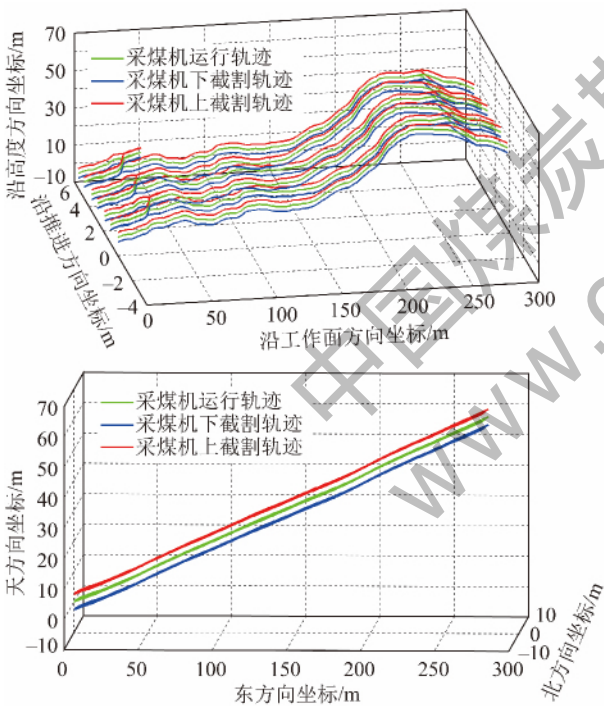


图 8 采煤机运行轨迹及其滚筒截割轨迹

Fig. 8 Running tracks and cutting tracks of a shearer

别为 0.200 m、0.207 m。误差产生原因主要有以下两个方面: ① 采煤机定位定姿误差。根据采煤机定位式(3)可知, 根据惯性测量装置测量的姿态角得到采煤机坐标系到东北天坐标系的方向余弦矩阵, 然后将采煤机坐标系下的位移增量矢量变换到东北天坐标系下, 在东北天坐标系下根据航位推算得到采煤机的位置, 由于姿态角测量存在误差, 使得每次坐标变换存在一定的误差, 航位推算造成误差的累积; ② 震

波 CT 的测量误差。由于震波是频散的, 波至时间不能准确估计, 并且在工作面和巷道之间的数据采集空间有限, 煤层中激发的震波相又相对复杂, 各种激发波互相叠加、干涉等, 给数据的处理和分析精度带来了一定的影响。可以通过提高惯性测量装置的精度和震波 CT 的探测精度, 以进一步降低误差。通过采煤机定位定姿数据在工作面巷道的数据处理系统中与工作面 GIS 数据库数据融合, 实现了采煤机对工作面煤层地质的感知, 为实现采煤机根据地质条件的自动调高提供了可参考的地质数据。

4 结 语

以山西某煤矿 18201 工作面为试验地点, 利用震波 CT 探测技术对工作面煤层进行了精细勘探, 构建了工作面煤层地理信息系统。以具有自动寻北功能的惯性导航装置、轴编码器为传感元件, 开发了基于工作面地理信息系统的采煤机定位定姿装置。经过工作面试验, 采煤机定位装置可实时测量采煤机行走轨迹、截割轨迹及其与煤层顶底板关系, 实现了采煤机在工作面煤层三维地质环境中的定位与煤层地质信息的感知, 为实现采煤机根据地质条件的自动调高提供了有力支撑。

参考文献:

[1] Michael S Kelly, David W Hainsworth. Outcomes of the landmark

- longwall automation project with reference to ground control issues [A]. 24th International Conference on Ground Control in Mining, Lakeview Scanticon Resort & Conference Center [C]. Morgantown, WV, USA, 2005.
- [2] David C Reid, David W Hainsworth, Jonathon C Ralston, et al. Shear guidance: A major advance in longwall mining [J]. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2006, 24: 469–476.
- [3] Ralston Jonathon, Reid David, Hargrave Chad, et al. Sensing for advancing mining automation capability: A review of underground automation technology development [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24: 305–310.
- [4] Jonathon C Ralston, Andrew D Strange. Developing selective mining capability for longwall shearers using thermal infrared-based seam tracking [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(1): 47–53.
- [5] David C Reid, Mark T Dunn, Peter B Reid, et al. A practical inertial navigation solution for continuous miner automation [A]. 2012 Coal Operators' Conference [C]. Wollongong: The University of Wollongong, 2012: 114–119.
- [6] Czwalińska J, Kubik J, Bigby D N. New mechanization and automation of longwall and drivage equipment [R]. Luxembourg: Research Fund for Coal and Steel, 2011: 7–130.
- [7] Lou Boltik, Evelyn Maki. Advanced shearer automation [J]. Coal International, 2013, 261(1): 61–64.
- [8] 田成金. 薄煤层自动化工作面关键技术现状与展望 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(8): 83–86.
Tian Chengjin. Status and outlook of key technology for automation coal mining face in thin seam [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(8): 83–86.
- [9] 郭周克. 薄煤层综采自动化配套装备开采技术 [J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(4): 24–27.
Guo Zhouke. Automatic matching equipment and technology of fully coal mining face in thin seam [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(4): 24–27.
- [10] 常培亮. “煤炭综采成套装备智能系统研发与应用”项目通过技术验收 [N]. <http://epaper.xsmd.com.cn/shtml/xsmdw/20140918/6705.shtml>, 2015-04-23.
- [11] Reid D C, Hainsworth D W, Ralston J C, et al. Longwall shearer guidance using inertial navigation (ACARP project C9015) [R]. CSIRO Exploration and Mining Report 832F, 2001.
- [12] 郝尚清, 王世博, 谢贵君, 等. 长壁综采工作面采煤机定位姿态技术研究 [J]. 工矿自动化, 2014, 40(6): 21–25.
Hao Shangqing, Wang Shibo, Xie Guijun, et al. Research of determination technologies of position and attitude of shearer on longwall fully mechanized coal mining face [J]. Industry and Automation, 2014, 40(6): 21–25.
- [13] Reid D C, Hainsworth D W, Ralston J C, et al. Inertial navigation: Enabling technology for longwall mining automation [R]. Calgary: Computer Applications in Minerals Industries, 2003.
- [14] 哈尔滨工业大学深圳研究院. 红外广角通讯同步积分型采煤机定位系统及定位方法 [P]. 中国专利: 101251590A, 2008-08-27.
- [15] 田丰, 秦涛, 刘华艳. 煤矿井下线型无线传感器网络节点定位算法 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1760–1764.
Tian Feng, Qin Tao, Liu Huayan. Nodes localization algorithm for linear wireless sensor network in underground coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10): 1760–1764.
- [16] Zhou Lijuan, Chen Guangzhu. Location strategy of shearer based on wireless sensor network [A]. Apperceiving Computing and Intelligence Analysis (ICACIA) [C], 2010: 169–173.
- [17] 袁红兵. 采煤机在线监测系统研究与应用 [J]. 机械工程与自动化, 2007(5): 94–95.
Yuan Hongbing. Research and application of on-line monitoring system of the mining machine [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2007(5): 94–95.
- [18] 樊启高, 李威, 王禹桥, 等. 一种采用捷联惯导的采煤机动态定位方法 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1758–1761.
Fan Qigao, Li Wei, Wang Yuqiao, et al. A shearer dynamic positioning method using strap down inertial navigation [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1758–1761.
- [19] Fang Xinqiu, Zhao Junjie, Hu Yuan. Tests and error analysis of a self-positioning shearer operating at a manless working face [J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(1): 53–58.
- [20] 张斌, 方新秋, 邹永洛, 等. 基于陀螺仪和里程计的无人工作面采煤机自主定位系统 [J]. 矿山机械, 2010, 38(9): 10–13.
Zhang Bin, Fang Xinqiu, Zou Yongming, et al. Auto-positioning system of shearer operating on manless working face based on gyroscope and odometer [J]. Mining & Processing Equipment, 2010, 38(9): 10–13.
- [21] 陈哲. 惯性导航系统原理 [M]. 北京: 宇航出版社, 1986: 62–63.
- [22] Reid D, Henderson P, Hainsworth D, et al. Interconnection of landmark compliant longwall mining equipment-shearer communication of functional specification for enhanced horizon control [R]. CSIRO Exploration & Mining, 2005.