

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107324

采煤机截割高度测量模型与测量误差分析*

王世佳, 王世博, 刘万里

(中国矿业大学机电工程学院 徐州 221116)

摘要:采煤机截割高度的测量及其误差分析是实现综采工作面自动化的一项重要研究内容。本文针对机身姿态传感器和摇臂摆角传感器测量方案、机身姿态传感器和调高油缸位移传感器测量方案,分别建立了采煤机截割高度测量模型。利用函数误差公式,推导了测量误差模型。以MG1000/2660-WD型采煤机为例,分析了截割高度测量误差分别随俯仰角、摇臂摆角和调高油缸位移的变化规律,得到了两种测量方案截割高度测量误差的最大值的位置。根据算例分析的结果可知,摇臂摆角传感器和调高油缸位移传感器的精度对测量误差的影响较小,机身姿态传感器的精度将决定截割高度测量误差的大小。最后,以采煤机截割高度测量误差小于5 cm为例进行分析,得出两种测量方案下各传感器的精度要求:摇臂摆角传感器精度为 0.022° 和机身姿态传感器的俯仰角最大动态误差小于 0.16° (1 h内),调高油缸位移传感器精度为1 mm和机身姿态传感器的俯仰角最大动态误差小于 0.14° (1 h内)。

关键词:采煤机;截割高度;测量模型;误差分析

中图分类号: TH701 TD421 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 440.60

The measurement model and error analysis for shearer cutting height

Wang Shijia, Wang Shibo, Liu Wanli

(School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The measurement and error analysis of shearer cutting height are a significant research task for the longwall mining automation. In this paper, aiming at the body attitude sensor and rocker-arm swing-angle sensor measurement scheme as well as the body attitude sensor and displacement sensor of height-adjustment hydro-cylinder measurement scheme, two measurement models of shearer cutting height are constructed, respectively. Adopting the function error formula, the measurement error models are obtained. Taking the type MG1000/2660-WD shearer as an example, the changing laws of the shearer cutting height versus pitch angle, rocker-arm swing-angle and displacement of height-adjustment hydro-cylinder are analyzed, and the positions where the shearer cutting heights have the maximum values in these two measurement schemes are obtained. According to the analysis result, the accuracies of the rocker-arm swing-angle sensor and displacement sensor of height-adjustment hydro-cylinder have a little influence on the measurement error, and the accuracy of the body attitude sensor would determine the measurement error of the cutting height. Finally, taking the case where the measurement error of shearer cutting height is less than 5 cm as an example, the accuracy requirements of the sensors in these two measurement schemes are obtained as follows: The accuracy of rocker-arm swing-angle sensor is 0.022° and the maximum dynamic error of the pitch angle of the body attitude sensor is less than 0.16° (within 1 hour), the accuracy of the displacement sensor of height-adjustment hydro-cylinder is 1 mm and the maximum dynamic error of pitch angle of the body attitude sensor is less than 0.14° (within 1 hour).

Keywords: shearer; cutting height; measurement model; error analysis

收稿日期: 2021-01-03 Received Date: 2021-01-03

* 基金项目: 国家自然科学基金(51874279, 51974290)、江苏省高校优势学科建设工程项目(PAPD)资助

0 引 言

综采工作面自动化是以综采机械装备为基础,通过集成先进的传感技术,实现采煤机可靠割煤与装煤,同时要保持工作面几何关系、设备姿态控制以及顶板支护。综采工作面自动化中的一个重要研究内容就是采煤机的自动调高,采煤机自动调高是在采煤机牵引运动时,其前后滚筒能随着煤层顶底板的起伏自动调整截割高度,以便能获得最大的采出率。目前国内外学者对于自动调高主要有两个方向。一是基于煤岩界面识别的直接调高技术,从20世纪六十年代,研究人员先后提出了天然 γ 射线^[1-2]、放射性同位素^[3]、雷达探测^[4-5]、测力截齿分析法^[6]、红外热成像分析^[7]、高光谱^[8-10]、太赫兹^[11-12]、多传感器融合技术^[13]等煤岩识别方法,但由于工作面环境恶劣、煤岩属性多变、识别实时性等原因,直接调高技术均未在工作面获得应用。二是基于记忆截割的间接调高技术^[14-18],其基本原理是采煤机操作人员沿工作面预先截割一刀,采煤机控制系统将采煤机的位置、姿态和滚筒高度等参数存储,在接下来的截割循环中,采煤机根据记忆的工作位置以及相应的截割参数进行自动截割。但这种调高方式只适用于近水平煤层,在煤层地质条件变化时很难适用。针对复杂地质煤层,本文作者所在课题组提出了基于煤层地理信息系统(geographic information system, GIS)的自动调高技术,即首先利用震波CT(computerized tomography)探测工作面煤层厚度变化,结合地质测量巷道钻孔探测的煤厚值建立工作面煤层GIS^[19-20]。利用采煤机定位技术^[21-22]获得采煤机在煤层中的位姿。根据采煤机的位置,提取煤层GIS的煤层厚度曲线作为采煤机滚筒截割边界曲线进行自动调高^[23-24]。无论是基于记忆截割的调高控制还是基于煤层GIS的调高控制,都是使采煤机滚筒位置能够跟踪顶底板目标曲线。采煤机调高精度是影响滚筒逼近目标曲线的重要参数,因此,我国2017年度“公共安全风险防控与应急技术装备”重点专项中“煤矿智能开采安全技术与装备研发”指南中明确提出了采煤机调高精度误差小于5 cm (<http://news.21csp.com.cn/c3/201610/11353619.html>)。

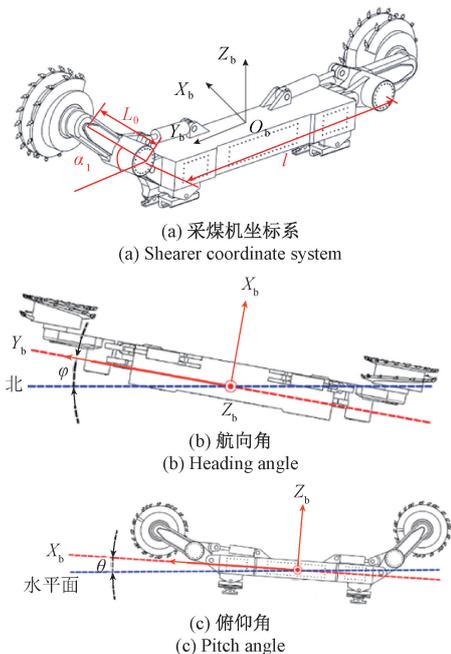
采煤机调高精度由采煤机截割高度测量精度和采煤机液压调高系统控制精度决定。研究者针对采煤机液压调高系统控制精度,开展了调高压系统控制策略的相关基础研究。杨秋等^[25]针对电磁阀控液压缸的开关控制特性,运用模糊算法进行采煤机调高油缸位移自动控制研究。张修荣^[26],张春雨^[27],张义龙^[28]用比例方向流量阀作为主控元件,以磁致伸缩位移传感器做检测元件测量调高油缸位移信号组成比例闭环控制系统,仿真研

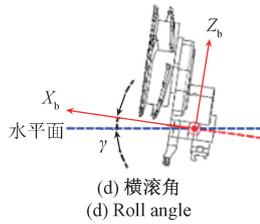
究了PID控制算法对油缸位移控制精度的影响。苏秀平等^[29]基于采煤机调高油缸电液比例伺服控制,建立了调高油缸的状态方程和滑模控制函数,仿真分析了调高油缸的控制特性。张寅锋^[30]利用matlab和AMESim建立了采煤机调高控制系统和液压系统联合仿真模型,研究了截割滚筒对目标曲线的跟踪精度。这些研究把采煤机截割高度调整转换为调高油缸位移的控制,但采煤机截割高度不但受调高油缸位移的影响,而且受采煤机机身姿态的影响。目前对于采煤机截割高度测量精度的研究未见报道。本文分别利用机身姿态传感器与摇臂摆角传感器的组合方案、机身姿态传感器与调高油缸位移传感器的组合方案建立采煤机截割高度测量模型和测量误差模型,分析两种测量方案下采煤机截割高度测量误差取得最大值时的位置,提出满足截割高度测量误差要求的传感器误差分配方法。

1 采煤机截割高度测量模型与测量误差模型

1.1 采煤机截割高度测量模型

图1(a)为采煤机坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$ 示意图,其中, O_b 为采煤机质心。在本文中,东北天坐标系作为导航坐标系。采煤机姿态由航向角(φ)、俯仰角(θ)和横滚角(γ)描述。图1(b)航向角是 Y_b 轴与北方向的夹角,其定义域为($0^\circ, 360^\circ$)。在行进方向上,采煤机机身与水平面的夹角为俯仰角如图1(c)所示,其定义域为($-90^\circ, 90^\circ$)。在采煤机横轴方向上,机身与水平面的夹角称为横滚角如图1(d)所示,其定义域为($-90^\circ, 90^\circ$)。



图1 采煤机坐标系及其姿态角示意图^[31]Fig. 1 Shearer coordinate system and its attitude angles^[31]

本文以采煤机坐标系中 Y_b, Z_b 平面作为研究平面。在 Y_b, Z_b 坐标系中,前后滚筒中心相对于采煤机质心的位置可表示为:

$$\mathbf{P}_1^b = \begin{bmatrix} l/2 + L_0 \cos \alpha_1 \\ L_0 \sin \alpha_1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{P}_2^b = \begin{bmatrix} -l/2 - L_0 \cos \alpha_2 \\ L_0 \sin \alpha_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, l 为采煤机两摇臂回转中心长度, L_0 为摇臂长度, α_1, α_2 分别为前后摇臂的摆角 ($0^\circ < \alpha_1 < 90^\circ$, $-90^\circ < \alpha_2 < 0^\circ$)。式(1)中的相对位置关系可利用旋转矩阵转化到北天坐标系下。旋转矩阵中的元素由采煤机姿态角的三角函数运算组成。由图1(b)、(c)、(d)及姿态角的定义可知,航向角影响采煤机滚筒东和北方向的位置,俯仰角影响采煤机滚筒北和天方向位置,横滚角基本不影响采煤机滚筒位置。因此,旋转矩阵 \mathbf{C}_b^n 中的元素只含有俯仰角的三角函数运算,其可表述为式(2)。

$$\mathbf{C}_b^n = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

在北天坐标系下,前后滚筒中心相对于采煤机质心的位置分别为:

$$\mathbf{P}_1^n = \mathbf{C}_b^n \mathbf{P}_1^b = \begin{bmatrix} (l/2 + L_0 \cos \alpha_1) \cos \theta - (L_0 \sin \alpha_1) \sin \theta \\ (l/2 + L_0 \cos \alpha_1) \sin \theta + (L_0 \sin \alpha_1) \cos \theta \\ l \cos \theta / 2 + L_0 \cos(\alpha_1 + \theta) \\ l \sin \theta / 2 + L_0 \sin(\alpha_1 + \theta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Z = l \sin \theta + L_0 \sin \left(\pi - \zeta - \varepsilon - \arccos \frac{L_{AB}^2 + L_{AD}^2 - (L_{BC} + L_{CD})^2}{2L_{AB}L_{AD}} + \theta \right) + L_0 \sin \left(\theta + \pi - \zeta' - \varepsilon' - \arccos \frac{L_{AB}'^2 + L_{AD}'^2 - (L_{BC}' + L_{CD}')^2}{2L_{AB}'L_{AD}'} \right) + 2R \quad (9)$$

1.2 采煤机截割高度测量误差模型

采煤机截割高度是由多个传感器的输出数据经过相关计算得到的。可以这样认为,各个传感器的输出数据是直接测量值,采煤机截割高度是间接测量值,间接测量值和直接测量值具有一定的函数关系,也就是第一部分的测量模型。同样地,间接测量值的误差也应该是各个

$$\mathbf{P}_2^n = \mathbf{C}_b^n \mathbf{P}_2^b = \begin{bmatrix} (-l/2 - L_0 \cos \alpha_2) \cos \theta - (L_0 \sin \alpha_2) \sin \theta \\ (-l/2 - L_0 \cos \alpha_2) \sin \theta + (L_0 \sin \alpha_2) \cos \theta \\ -l \cos \theta / 2 - L_0 \cos(\theta - \alpha_2) \\ -l \sin \theta / 2 - L_0 \sin(\theta - \alpha_2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

采煤机截割高度为前滚筒最高点与后滚筒最低点的高度差。因此,采煤机截割高度可表达为:

$$Z = \left[\frac{l \sin \theta}{2} + L_0 \sin(\alpha_1 + \theta) \right] - \left[\frac{-l \sin \theta}{2} - L_0 \sin(\theta - \alpha_2) \right] + 2R = l \sin \theta + L_0 \sin(\alpha_1 + \theta) + L_0 \sin(\theta - \alpha_2) + 2R \quad (5)$$

其中, R 为前后滚筒半径。

式(5)中除 l, L_0 和 R 是已知的采煤机结构参数外,俯仰角 θ 和摇臂摆角 α_1, α_2 分别需要机身姿态传感器和摇臂摆角传感器进行测量。实际上,通过机身姿态传感器和调高油缸位移传感器的测量数据也可以得到采煤机截割高度。图2为前摇臂调高结构简图。前摇臂摆角 α_1 与调高油缸位移 L_{CD} 具有确定的关系。在三角形 ABD 中,由余弦定理可得:

$$(L_{BC} + L_{CD})^2 = L_{AB}^2 + L_{AD}^2 - 2L_{AB}L_{AD} \cos(\pi - \zeta - \varepsilon - \alpha_1) \quad (6)$$

则前摇臂摆角可表达为:

$$\alpha_1 = \pi - \zeta - \varepsilon - \arccos \frac{L_{AB}^2 + L_{AD}^2 - (L_{BC} + L_{CD})^2}{2L_{AB}L_{AD}} \quad (7)$$

其中, $L_{AB}, L_{AD}, L_{BC}, \zeta, \varepsilon$ 为前摇臂已知参数。同理得后摇臂摆角为:

$$\alpha_2 = - \left(\pi - \zeta' - \varepsilon' - \arccos \frac{L_{AB}'^2 + L_{AD}'^2 - (L_{BC}' + L_{CD}')^2}{2L_{AB}'L_{AD}'} \right) \quad (8)$$

其中, L_{CD}' 为后摇臂调高油缸位移; $L_{AB}', L_{AD}', L_{BC}', \zeta', \varepsilon'$ 为后摇臂已知参数。因此,当使用机身姿态传感器和调高油缸位移传感器时,采煤机截割高度可用式(9)表示。

直接测量值误差的函数,故称这种间接测量值的误差为函数误差^[32-34]。设间接测量中,间接测量值 y 是各个直接测量值 x_i 的多元函数,其表达式为:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (10)$$

对于多元函数,其增量可以用函数的全微分表示,则函数增量为:

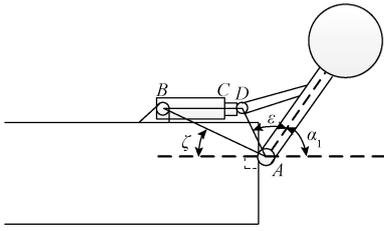


图2 前摇臂调高结构

Fig.2 Front rocker-arm height-adjustment structure

$$dy = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} dx_n \quad (11)$$

$$\Delta Z = \frac{\partial Z}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial Z}{\partial \alpha_1} \Delta \alpha_1 + \frac{\partial Z}{\partial \alpha_2} \Delta \alpha_2 = [l \cos \theta + L_0 \cos(\alpha_1 + \theta) + L_0 \cos(\alpha_2 - \theta)] \Delta \theta + L_0 \cos(\alpha_1 + \theta) \Delta \alpha_1 + L_0 \cos(\alpha_2 - \theta) \Delta \alpha_2 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta Z &= \frac{\partial Z}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial Z}{\partial L_{CD}} \Delta L_{CD} + \frac{\partial Z}{\partial L'_{CD}} \Delta L'_{CD} = \left[l \cos \theta + L_0 \cos \left(\pi - \zeta - \varepsilon - \arccos \frac{L_{AB}^2 + L_{AD}^2 - (L_{BC} + L_{CD})^2}{2L_{AB}L_{AD}} + \theta \right) \right. \\ &+ \left. L_0 \cos \left(- \left(\pi - \zeta' - \varepsilon' - \arccos \frac{L'_{AB}{}^2 + L'_{AD}{}^2 - (L'_{BC} + L'_{CD})^2}{2L'_{AB}L'_{AD}} \right) - \theta \right) \right] \Delta \theta + \\ &L_0 \cos \left(\pi - \zeta - \varepsilon - \arccos \frac{L_{AB}^2 + L_{AD}^2 - (L_{BC} + L_{CD})^2}{2L_{AB}L_{AD}} + \theta \right) \left| \frac{-(L_{BC} + L_{CD})}{L_{AB}L_{AD} \sqrt{1 - \left(\frac{L_{AB}^2 + L_{AD}^2 - (L_{BC} + L_{CD})^2}{2L_{AB}L_{AD}} \right)^2}} \right| \Delta L_{CD} + \\ &L_0 \cos \left(\pi - \zeta' - \varepsilon' - \arccos \frac{L'_{AB}{}^2 + L'_{AD}{}^2 - (L'_{BC} + L'_{CD})^2}{2L'_{AB}L'_{AD}} + \theta \right) \left| \frac{-(L'_{BC} + L'_{CD})}{L'_{AB}L'_{AD} \sqrt{1 - \left(\frac{L'_{AB}{}^2 + L'_{AD}{}^2 - (L'_{BC} + L'_{CD})^2}{2L'_{AB}L'_{AD}} \right)^2}} \right| \Delta L'_{CD} \quad (14) \end{aligned}$$

2 采煤机截割高度测量误差最值位置

对于采用机身姿态传感器和摇臂摆角传感器测量采煤机截割高度的方案,本节以MG1000/2660-WD型采煤机为例分析截割高度测量误差随俯仰角和摇臂摆角的变化情况。其中, $l=9.820\text{ m}$, $L_0=3.535\text{ m}$ 。机身姿态测量采用SST800型传感器,经过相关测试,其在1h内的最大动态误差为 0.7° ,故俯仰角误差 $\Delta\theta$ 设为 0.7° 。摇臂摆角测量采用EXME-Canopen型传感器,其最大分辨率为 $1/16\ 384$ 。在本文中摇臂摆角测量误差 $\Delta\alpha_1$ 取为 0.022° ($360^\circ/16\ 384$)。SST800和EXME-Canopen均为采煤机生产厂家广泛应用的传感器型号。因前后摇臂所使用的摆角传感器型号相同,为了简化运算,以前滚筒高度测量误差 ΔZ_1 为例进行分析,其可表示为式(15)。其中,俯仰角 θ 取值范围为 $(-20^\circ, 20^\circ)$,前摇臂摆角 α_1 取值范围为 $(0^\circ, 50.88^\circ)$ 。

$$\begin{aligned} \Delta Z_1 &= \frac{\partial Z_1}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial Z_1}{\partial \alpha_1} \Delta \alpha_1 = \\ &\left[\frac{l \cos \theta}{2} + L_0 \cos(\alpha_1 + \theta) \right] \Delta \theta + L_0 \cos(\alpha_1 + \theta) \Delta \alpha_1 \quad (15) \end{aligned}$$

若已知各个直接测量值的误差 Δx_i ,则函数误差 Δy 可表示为

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (12)$$

其中, $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 为误差传递系数。式(12)即为函数误差公式。对于在采煤机上安装机身姿态传感器和摇臂摆角传感器的方案,截割高度测量误差可表示为式(13)。对于在采煤机上安装机身姿态传感器和调高油缸位移传感器的方案,截割高度测量误差可表示为式(14)。

图3为俯仰角 θ 分别取 -20° 、 -10° 、 0° 、 10° 和 20° 时,前滚筒高度测量误差 ΔZ_1 随摇臂摆角 α_1 变化曲线。当 θ 为 -20° 和 -10° 时, ΔZ_1 先增大后减小。当 θ 为 0° 、 10° 和 20° 时, ΔZ_1 一直减小。由此可知,当 $\theta < 0^\circ$ 时, ΔZ_1 先增大后减小。当 $\theta \geq 0^\circ$ 时, ΔZ_1 一直减小。

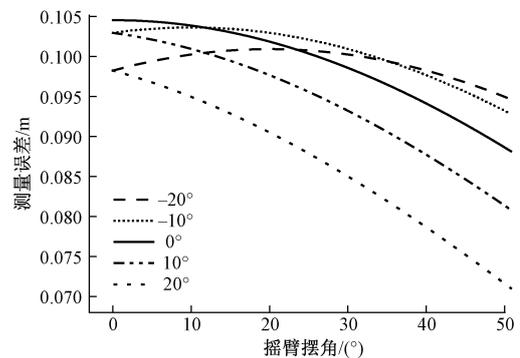


图3 不同俯仰角条件下前滚筒高度测量误差随摇臂摆角变化曲线

Fig.3 The changing curve of measurement error of front drum height vs. rocker-arm swing-angle under different pitch angles

图4为摇臂摆角 α_1 分别取 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 和 50° 时,前滚筒高度测量误差 ΔZ_1 随俯仰角 θ 变化曲线。当 α_1 为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 和 40° 时, ΔZ_1 先增大后减小。当 α_1 为 50° 时, ΔZ_1 一直减小。

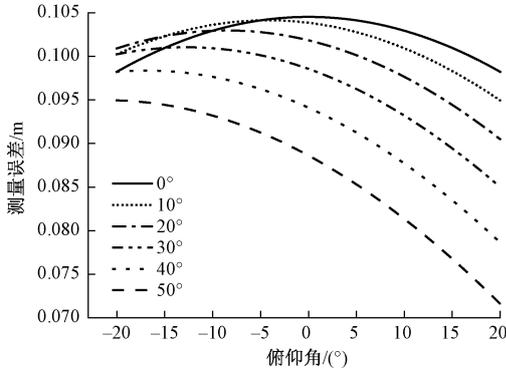


图4 不同摇臂摆角条件下前滚筒高度测量误差随俯仰角变化曲线

Fig. 4 The changing curve of measurement error of front drum height vs. pitch angle under different rocker-arm swing-angles

图5为前滚筒高度测量误差 ΔZ_1 随俯仰角 θ 和摇臂摆角 α_1 变化示意图。根据图3、4和5及以上分析可知,当 $\theta=0^\circ$ 、 $\alpha_1=0^\circ$ 时, ΔZ_1 取得最大值,此时 $\Delta Z_1=0.105$,即前滚筒截割高度测量误差最大为10.5 cm。因前后摇臂所使用的摆角传感器相同,后滚筒高度测量误差最大也为10.5 cm。因此,采煤机截割高度测量误差最大为21.0 cm。

对于采用机身姿态传感器和调高油缸位移传感器测量采煤机截割高度的方案,本部分同样以MG1000/2660-

$$\Delta Z_1 = \frac{\partial Z_1}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial Z_1}{\partial L_{CD}} \Delta L_{CD} = \left[\frac{l \cos \theta}{2} + L_0 \cos \left(\pi - \zeta - \varepsilon - \arccos \frac{L_{AB}^2 + L_{AD}^2 - (L_{BC} + L_{CD})^2}{2L_{AB}L_{AD}} + \theta \right) \right] \Delta \theta + L_0 \cos \left(\pi - \zeta - \varepsilon - \arccos \frac{L_{AB}^2 + L_{AD}^2 - (L_{BC} + L_{CD})^2}{2L_{AB}L_{AD}} + \theta \right) \left| \frac{-(L_{BC} + L_{CD})}{L_{AB}L_{AD} \sqrt{1 - \left(\frac{L_{AB}^2 + L_{AD}^2 - (L_{BC} + L_{CD})^2}{2L_{AB}L_{AD}} \right)^2}} \right| \Delta L_{CD} \quad (16)$$

图6为俯仰角 θ 分别取 -20° 、 -10° 、 0° 、 10° 和 20° 时,前滚筒高度测量误差 ΔZ_1 随调高油缸位移 L_{CD} 变化曲线。当 θ 为 -20° 和 -10° 时, ΔZ_1 先增大后减小。当 θ 为 0° 、 10° 和 20° 时, ΔZ_1 一直增大。由此可知,当 $\theta < 0^\circ$ 时, ΔZ_1 先增大后减小。当 $\theta \geq 0^\circ$ 时, ΔZ_1 一直增大。由图2的前摇臂调高结构简图可以看出,调高油缸位移越长所对应的摇臂摆角越小。因此,图3和6所反映出的规律是一样的。

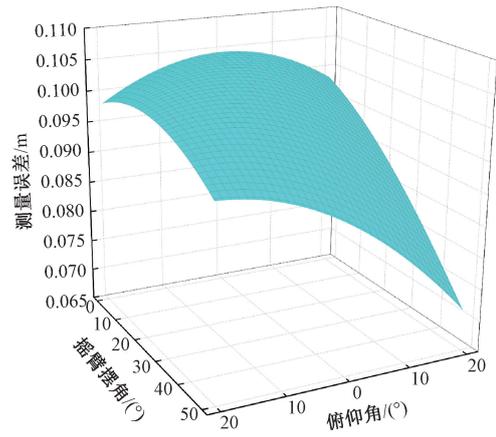


图5 前滚筒高度测量误差随摇臂摆角和俯仰角变化

Fig. 5 The changing of measurement error of front drum height vs. rocker-arm swing-angle and pitch angle

WD型采煤机为例分析截割高度测量误差随俯仰角和调高油缸位移的变化情况。因前后摇臂所使用的调高油缸位移传感器相同,为了简化计算,本部分对前滚筒高度测量误差进行分析。其中, $l=9.820$ m, $L_0=3.535$ m, $\zeta=15^\circ$, $\varepsilon=80^\circ$, $L_{AB}=2.488$ m, $L_{AD}=0.843$ m, $L_{BC}=1.850$ m。俯仰角 θ 和调高油缸位移 L_{CD} 的取值范围分别为 $(-20^\circ, 20^\circ)$ 和 $(0$ m, 0.71 m)。机身姿态测量同样采用SST800型传感器,俯仰角误差 $\Delta\theta$ 取为 0.7° 。调高油缸位移传感器为采煤机厂家广泛使用的ICT820型传感器,其精度为1 mm,故 ΔL_{CD} 设为0.001 m。前滚筒高度测量误差可表示为式(16)。

图7为在不同调高油缸位移 L_{CD} 条件时,前滚筒高度测量误差 ΔZ_1 随俯仰角 θ 变化曲线。其中, L_{CD} 分别取为0.01 m、0.13 m、0.27 m、0.41 m、0.56 m和0.71 m,其所对应的摇臂摆角分别为 50° 、 40° 、 30° 、 20° 、 10° 和 0° 。当 L_{CD} 为0.13、0.27、0.41、0.56和0.71 m时, ΔZ_1 先增大后减小。当 L_{CD} 为0.01 m时, ΔZ_1 一直减小。图4和7所反映出的规律是一样的。

图8为前滚筒高度测量误差 ΔZ_1 随俯仰角 θ 和调高

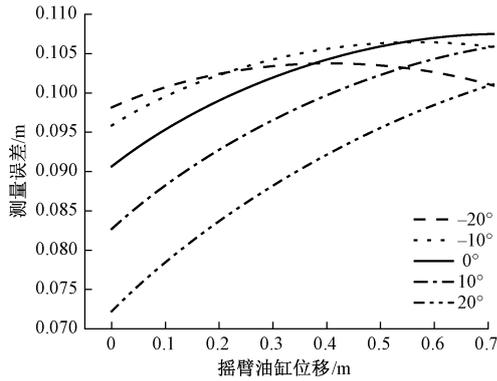


图 6 不同俯仰角条件下前滚筒高度测量误差随调高油缸位移变化曲线

Fig. 6 The changing curve of measurement error of front drum height vs. displacement of height-adjustment hydro-cylinder under different pitch angles

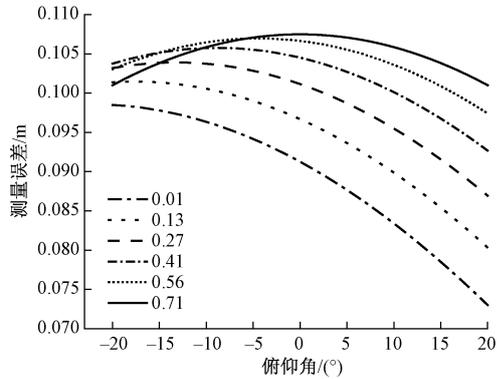


图 7 不同调高油缸位移条件下前滚筒高度测量误差随俯仰角变化曲线

Fig. 7 The changing curve of measurement error of front drum height vs. pitch angle under different displacements of height-adjustment hydro-cylinder

油缸位移 L_{CD} 变化示意图。根据图 6、7 和 8 及以上分析可知,当 $\theta=0.11^\circ$, $L_{CD}=0.71$ m 时, ΔZ_1 取得最大值,此时 $\Delta Z_1=0.108$ m,即前滚筒高度测量误差最大为 10.8 cm。因前后摇臂所使用的调高油缸位移传感器相同,后滚筒高度测量误差最大同样为 10.8 cm,那么采煤机截割高度测量误差最大为 21.6 cm。

根据以上分析,对于两种测量方案,都会存在一个最值位置,此时采煤机截割高度测量误差最大。对于机身姿态传感器和摇臂摆角传感器的测量方案, $\theta=0^\circ$ 且 $\alpha_1=0^\circ$ 为采煤机截割高度测量误差的最值位置。对于机身姿态传感器和调高油缸位移传感器的测量方案, $\theta=0.11^\circ$ 且 $L_{CD}=0.71$ m 为采煤机截割高度测量误差最值位置。当越远离最值位置时,截割高度测量误差越小。除此之外,采煤机截割高度测量误差会随着 L_0 和 l 的增

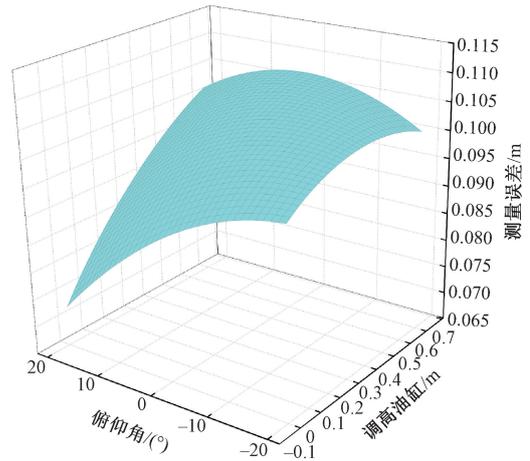


图 8 前滚筒高度测量误差随俯仰角和调高油缸位移变化

Fig. 8 The changing of measurement error of front drum height vs. pitch angle and displacement of height-adjustment hydro-cylinder

大而增大,这就需要在设计采煤机结构参数时考虑截割高度测量误差的要求。

3 算例分析

基于第 1 节所建立的采煤机截割高度测量误差模型,当已知各个传感器测量误差,可计算出截割高度测量误差。反过来,当已知截割高度测量误差,合理进行误差分配,确定各个传感器的精度,这就是误差分配的问题^[32-34]。本部分假设采煤机截割一刀需要 1 h,在一刀过程中以采煤机截割高度测量误差小于 5 cm 作为目标,确定两种测量方案下传感器精度。

对于采用机身姿态传感器和摇臂摆角传感器的测量方案,本部分以 MG1000/2660-WD 型采煤机为例进行算例分析。根据第 2 节的分析可知,在使用 SST800 和 EXME-Canopen 传感器的前提下,当 $\theta=0^\circ$, $\alpha_1=0^\circ$ 时, ΔZ_1 取得最大值(0.105 m)。此时,根据式(17)和(18)计算可知,由俯仰角测量误差所引起的前滚筒高度测量误差占总误差的比例(δ_1)为 98.7%,而由摇臂摆角测量误差所引起的前滚筒高度测量误差占总误差的比例(δ_2)仅为 1.3%。本文中所采用的 EXME-Canopen 型摇臂摆角传感器被采煤机生产厂家广泛应用。如果采用更高或更低精度的摆角传感器,其引起的截割高度测量误差占总误差的比例依然很低。为了具体说明此问题,假定摇臂摆角传感器精度为 0.011° 和 0.044° ,根据式(18)计算可

知,其引起的前滚筒高度测量误差占总误差的比例分别为0.7%和2.6%。另外,对于摇臂摆角传感器来说,0.022°的精度是较容易达到的。因此,我们首先选定摇臂摆角传感器精度为0.022°,再根据采煤机截割高度测量误差的要求,在 $\theta=0^\circ, \alpha_1=0^\circ$ 的最值位置条件下,利用式(19)确定俯仰角精度。因前后摇臂所用摆角传感器相同,故前滚筒高度测量误差小于2.5 cm即可满足采煤机截割高度测量误差小于5 cm的要求,此时,计算出 $\Delta\theta$ 为0.16°。因此,当摇臂摆角传感器精度为0.022°,机身姿态传感器的俯仰角最大动态误差小于0.16°(1 h内)时,可实现采煤机截割高度测量误差小于5 cm。

$$\delta_1 = \frac{\left[\frac{l \cos \theta}{2} + L_0 \cos(\alpha_1 + \theta) \right] \Delta \theta}{\Delta Z_1} \quad (17)$$

$$\delta_2 = \frac{L_0 \cos(\alpha_1 + \theta) \Delta \alpha_1}{\Delta Z_1} \quad (18)$$

$$\Delta \theta = \frac{\Delta Z_1 - L_0 \cos(\alpha_1 + \theta) \Delta \alpha_1}{\frac{l \cos \theta}{2} + L_0 \cos(\alpha_1 + \theta)} \quad (19)$$

$$\delta_3 = \frac{\left[\frac{l \cos \theta}{2} + L_0 \cos \left(\pi - \zeta - \varepsilon - \arccos \frac{L_{AB}^2 + L_{AD}^2 - (L_{BC} + L_{CD})^2}{2L_{AB}L_{AD}} + \theta \right) \right] \Delta \theta}{\Delta Z_1} \quad (20)$$

$$\delta_4 = \frac{L_0 \cos \left(\pi - \zeta - \varepsilon - \arccos \frac{L_{AB}^2 + L_{AD}^2 - (L_{BC} + L_{CD})^2}{2L_{AB}L_{AD}} + \theta \right) \left| \frac{-(L_{BC} + L_{CD})}{L_{AB}L_{AD} \sqrt{1 - \left(\frac{L_{AB}^2 + L_{AD}^2 - (L_{BC} + L_{CD})^2}{2L_{AB}L_{AD}} \right)^2}} \right| \Delta L_{CD}}{\Delta Z_1} \quad (21)$$

$$\Delta \theta =$$

$$\frac{\Delta Z_1 - L_0 \cos \left(\pi - \zeta - \varepsilon - \arccos \frac{L_{AB}^2 + L_{AD}^2 - (L_{BC} + L_{CD})^2}{2L_{AB}L_{AD}} + \theta \right) \left| \frac{-(L_{BC} + L_{CD})}{L_{AB}L_{AD} \sqrt{1 - \left(\frac{L_{AB}^2 + L_{AD}^2 - (L_{BC} + L_{CD})^2}{2L_{AB}L_{AD}} \right)^2}} \right| \Delta L_{CD}}{\frac{l \cos \theta}{2} + L_0 \cos \left(\pi - \zeta - \varepsilon - \arccos \frac{L_{AB}^2 + L_{AD}^2 - (L_{BC} + L_{CD})^2}{2L_{AB}L_{AD}} + \theta \right)} \quad (22)$$

通过以上的分析可以看出,摇臂摆角传感器和调高油缸位移传感器的精度对于采煤机截割高度测量误差的影响比较小,而机身姿态传感器的俯仰角精度将决定采煤机截割高度测量误差的大小。对于采煤机截割高度测量误差小于5 cm的目标,两种测量方案下各传感器精度要求分别为:摇臂摆角传感器精度为0.022°和机身姿态传感器的俯仰角最大动态误差小于0.16°(1 h内),调高油缸位移传感器精度为1 mm和机身姿态传感器的俯仰角最大动态误差小于0.14°(1 h内)。

对于采用机身姿态传感器和调高油缸位移传感器的测量方案,本部分同样以MG1000/2660-WD型采煤机为例进行算例分析。基于第2节的分析结果可知, ΔZ_1 取得最大值(0.108 m)时的俯仰角和调高油缸位移分别为0.11°和0.71 m。式(20)和(21)分别为这两种传感器的测量误差所引起的截割高度误差占总误差比例的计算方法。在使用SST800和ICT820传感器的前提下,计算出的这两个比例分别为96.0%和4.0%。假定所采用的调高油缸位移传感器精度分别为0.5 mm和2 mm,根据式(21)计算可知,其测量误差所引起的前滚筒高度测量误差占总误差的比例为2.1%和7.7%。由此可知,调高油缸位移测量误差对于截割高度测量误差的影响较小。因此,我们首先选定调高油缸位移传感器精度为1 mm,再根据采煤机截割高度测量误差的要求,在 $\theta=0.11^\circ, L_{CD}=0.71$ m的最值位置前提下,利用式(22)确定俯仰角精度,计算出 $\Delta\theta$ 为0.14°。因此,当调高油缸位移传感器精度为1 mm,机身姿态传感器的俯仰角最大动态误差小于0.14°(1 h内)时,可实现采煤机截割高度测量误差小于5 cm。

4 结 论

本文利用两种测量方案,即机身姿态传感器与摇臂摆角传感器的组合方案、机身姿态传感器与调高油缸位移传感器的组合方案,建立了采煤机截割高度测量模型。根据函数误差计算公式,建立了截割高度测量误差模型,分析得到了采煤机截割高度测量误差最大值。经过相关计算可知,摇臂摆角传感器和调高

油缸位移传感器的精度对测量误差的影响较小,机身姿态传感器的精度将决定截割高度测量误差的大小。最后,以采煤机截割高度测量误差小于5 cm为例进行分析,得出两种测量方案下各传感器的精度要求:摇臂摆角传感器精度为 0.022° 和机身姿态传感器的俯仰角最大动态误差小于 0.16° (1 h内),调高油缸位移传感器精度为1 mm和机身姿态传感器的俯仰角最大动态误差小于 0.14° (1 h内)。

参考文献

- [1] BESSINGER S L, NELSON M G. Remnant roof coal thickness measurement with passive gamma ray instruments in coal mines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, 29(3): 562-565.
- [2] 王增才,张秀娟. 自然 γ 射线煤岩界面识别研究[J]. 煤矿机械, 1999, 1(6): 16-18.
WANG Z C, ZHANG X J. Research on the coal and rock interface recognition with γ radiation [J]. Coal Mine Machinery, 1999, 1(6): 16-18.
- [3] FROSCHE R A, ROSE S D, CROUCH C E, et al. Coal-rock interface detector: US4165460 [P]. 1979-8-21.
- [4] MIAO SH G, LIU X W, LIU ZH Y, et al. Ground penetrating radar based experimental simulation and signal interpretation on coal-rock interface detection[C]. IOP Conference Series, 2018, DOI: 10.1088/1757-899X/439/5/052018.
- [5] 苗曙光,刘晓文,李淮江,等. 基于探地雷达的煤岩界面探测数据解释方法[J]. 工况自动化, 2019, 45(1): 35-39.
MIAO SH G, LIU X W, LI H J, et al. Data interpretation method of coal-rock interface detection based on ground penetrating radar[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(1): 35-39.
- [6] 廉自生,刘混举,李文英. 基于切割力响应的煤岩界面识别技术研究[J]. 山西机械, 1999(2): 25-27.
LIAN Z SH, LIU H J, LI W Y. Study on the coal-rock interface recognition based on the responses of shearer's cutting force[J]. Shanxi Machinery, 1999(2): 25-27.
- [7] RALSTON J C, STRANGE A D. 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.
- [8] 杨恩,王世博,葛世荣,等. 煤岩界面的高光谱识别原理[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S2): 646-653.
YANG EN, WANG SH B, GE SH R, et al. Study on the principle of hyperspectral recognition of coal-rock interface [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S2): 646-653.
- [9] 向阳,王世博,葛世荣,等. 粉尘环境下典型煤岩近红外光谱特征及识别方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(11): 3430-3437.
XIANG Y, WANG SH B, GE SH R, et al. Study on near-infrared spectrum features and identification method of typical coal-rock in dust environment [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(11): 3430-3437.
- [10] 杨恩,王世博,葛世荣. 典型块状煤的可见-近红外光谱特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(6): 1717-1723.
YANG EN, WANG SH B, GE SH R. Study on the visible and near-infrared spectra of typical types of lump coal [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(6): 1717-1723.
- [11] 王昕,苗曙光,丁恩杰. 煤岩介质在太赫兹频段的介电特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(4): 739-746.
WANG X, MIAO SH G, DING EN J. Study of dielectric property of coal and rock medium in Terahertz domain [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(4): 739-746.
- [12] WANG X, HU K, ZHANG L, et al. Characterization and classification of coals and rocks using terahertz time-domain spectroscopy [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2017, 38(2): 248-260.
- [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 F. 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] LI W, LUO C, YANG H, et al. Memory cutting of adjacent coal seams based on a hidden Markov model [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7(12): 5051-5060.
- [15] 邢永峰. 基于灰色马尔科夫模型的采煤机自适应截割

- 策略研究[J]. 煤矿机械, 2014, 35(10): 245-247.
- XING Y F. Research of adaptive cutting strategy of shearer based on gray markov model [J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(10): 245-247.
- [16] 刘春生, 陈金国. 基于单示范刀采煤机记忆截割的数学模型[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(3): 71-73.
- LIU CH SH, CHEN J G. Mathematic model of memory cutting for coal shearer based on single demo knife[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(3): 71-73.
- [17] 高永新, 卢晓路. 采煤机截齿力学特性优化的记忆截割系统[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然版), 2016, 35(6): 642-645.
- GAO Y X, LU X L. Optimization of shearer's memory cutting system based on mechanical characteristics of cutting tooth [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2016, 35(6): 642-645.
- [18] XU Z, WANG Z. Modelling and simulation on shearer self-adaptive memory cutting[J]. Procedia Engineering, 2012, 37(4): 37-41.
- [19] 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.
- GE SH R, SU ZH SH, LI ANG, et al. Research on the positioning and orientation of a shearer based on geographic information system[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2503-2508.
- [20] 刘鹏, 孟磊, 王勃, 等. 基于位姿测量与煤层 DEM 的采煤机滚筒自动调高方法[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 470-475.
- LIU P, MENG L, WANG B, et al. An automatic height adjustment method for shearer drums based on pose measurement and coal seam DEM[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 470-475.
- [21] 李昂, 郝尚清, 王世博, 等. 基于 SINS/轴编码器组合的采煤机定位方法与试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(4): 95-100.
- LI ANG, HAO SH Q, WANG SH B, et al. Experimental study on shearer positioning method based on SINS and encoder [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4): 95-100.
- [22] 郝尚清, 李昂, 王世博, 等. 采煤机惯性导航安装偏差对定位误差的影响[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1963-1968.
- HAO SH Q, LI ANG, WANG SH B, et al. Effects of shearer inertial navigation installation noncoincidence on shearer positioning error [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1963-1968.
- [23] 郝尚清, 王世博, 谢贵君, 等. 长壁综采工作面采煤机定位定姿技术研究[J]. 工矿自动化, 2014, 40(6): 21-25.
- HAO SH Q, WANG SH B, XIE G J, et al. Research of determination technologies of position and attitude of shearer on longwall fully mechanized coal mining face[J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(6): 21-25.
- [24] 葛世荣, 王忠宾, 王世博. 互联网+采煤机智能化关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(7): 1-9.
- GE SH R, WANG ZH B, WANG SH B. Study on key technology of internet plus intelligent coal shearer[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 1-9.
- [25] 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.
- YANG Q, LI CH H. Simulation of shearer drum cutting with memory program controlling by fuzzy control [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(7): 822-825.
- [26] 张修荣. 采煤机滚筒自适应液压调高系统研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2009.
- ZHANG X R. Research of adaptive hydraulic shearer drum system [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2009.
- [27] 张春雨. 采煤机滚筒调高电液比例控制系统的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- ZHANG CH Y. Research on shearer roller's position adjustment system that based on electro-hydraulic proportional control [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.
- [28] 张义龙. 采煤机电液比例调高系统多软件协同仿真研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- ZHANG Y L. Research on co-simulation of shearer electro-hydraulic proportional height adjustment system based on multi-software [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2016.
- [29] 苏秀平, 李威, 樊启高. 采煤机滚筒调高滑模变结构控制策略[J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 2107-2111.
- SU X P, LI W, FAN Q G. A shearer drum height adjusting strategy using sliding-mode variable structure

- control [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 2107-2111.
- [30] 张寅锋. 滚筒式采煤机运动轨迹跟踪及控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
ZHANG Y F. Research on trajectory tracking and its control strategies of drum shearer [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [31] 鲁程, 王世博, 葛世荣, 等. 多惯导冗余的采煤机定位原理及其合理性分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(S2): 746-753.
LU CH, WANG SH B, GE SH R, et al. Redundant multi-INS positioning algorithm of shearer and analysis of its rationality[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S2): 746-753.
- [32] 惠连涛. 误差理论与数据处理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1992.
HUI L T. Error theory and data processing[M]. Tianjin University Press, 1992.
- [33] 蒋敏兰, 费业泰. 动态误差分解与溯源理论与方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8), 735-740.
JIANG M L, FEI Y T. Research on theory and method of dynamic error decomposition and tracing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(8), 735-740.
- [34] 蒋萍, 赵建玉. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.

防工业出版社, 2014.

JIANG P, ZHAO J Y. Error theory and data processing[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.

作者简介



王世佳, 2016年于河北建筑工程学院获得学士学位, 现为中国矿业大学博士研究生, 主要研究方向为矿山装备智能化。

Email: sjwang2017@163.com

Wang Shijia received his B.Sc. degree from Hebei University of Architecture in 2016. Now, he is a Ph. D. candidate in China University of Mining and Technology. His main research interest is mining equipment intelligentization.



王世博(通信作者), 2007年于中国矿业大学获得博士学位, 现为中国矿业大学教授, 主要研究方位为矿山装备智能化。

Email: wangshb@cumt.edu.cn

Wang Shibao (Corresponding author) received Ph. D. degree from China University of Mining and Technology in 2007. Now, he is a professor in China University of Mining and Technology. His main research interest is mining equipment intelligentization.