

# 悬臂式掘进机惯性测量系统的改进与试验

张国喜

(山西兰花科技创业股份有限公司大阳煤矿分公司)

**摘 要:**大阳煤矿在采掘中主要采用EBZ-160悬臂式掘进机,但在实际应用中,由于工作环境恶劣、巷道断面自动切割技术对掘进机惯导系统的精度有更高的要求,悬臂式掘进机自动定位精度难免发生失准的情况。零速修正技术是一种误差补偿的校正技术,可以有效消除掘进机长时间工作而累积的误差。在顺利完成工业性试验后,最终实现了掘进机的位姿的自动调整和纠偏,具有高效安全的实际应用效果。

**关键词:**悬臂式掘进机;惯性测量;掘进机位姿;零速修正

## 0 引言

近十年中,我国煤炭工业发生了由“粗放式”向“精细化”的转变,但随着采深的日益增加,部分老矿井的采深已经突破1000m<sup>[1]</sup>,其危险系数大、工作环境恶劣等不利条件日益严峻。因此,对综掘工作面的无人作业技术的研究迫在眉睫。悬臂式掘进机是巷道挖掘的重要设备,对煤矿巷道的成型有直接影响,如何提高悬臂式掘进机的控制精度、检测位姿状态是实现采掘设备自动化、智能化、无人化的前提所在,继而对提高企业生产效率、保障员工安全有重要意义。

## 1 悬臂式掘进机的位姿及惯性导航技术

目前,悬臂式掘进机在煤矿井下作业时,光电技术是最为常见的自动导航定位技术之一<sup>[2,3]</sup>。掘进机司机以矿用激光指示灯射在截割断面上的光束为基准,操作掘进机按照截割曲线示意图连续摆动完成工作,如图1所示。光电技术虽然具有技术成熟、定位精准、成本较低等优点,但也存在环境适应性差、光源易受灰尘(水雾)等影响的缺点。为了更好地指导悬臂式掘进机进行截割作业,惯性导航技术应运而生。

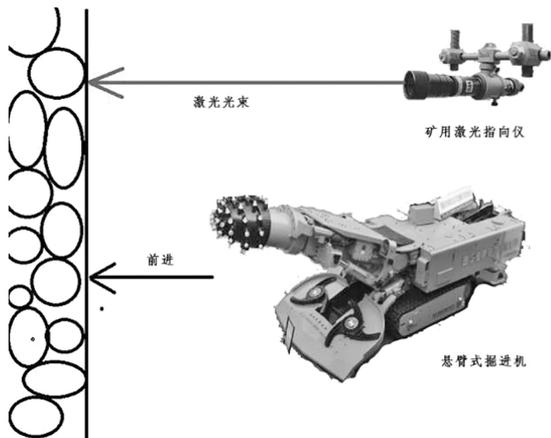


图1 光电技术下悬臂式掘进机井下载割工作

### 1.1 掘进机位姿

悬臂式掘进机在巷道内进行截割工作时出现的各种位置变化、姿态调整称之为掘进机的位姿,而如何实现悬臂式掘进机位姿的精准测量是综掘工作面实现无人化生产的关键。如图2所示,在矿井掘进过程中,将从俯视、侧视、后视三个角度对掘进机进行观察,从而设定路线操作掘进机进行挖掘、行走。

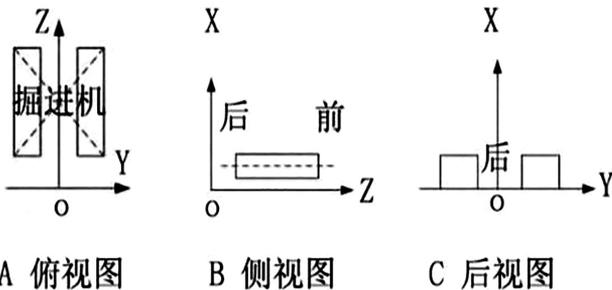
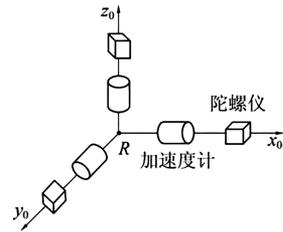


图2 掘进机位姿视图

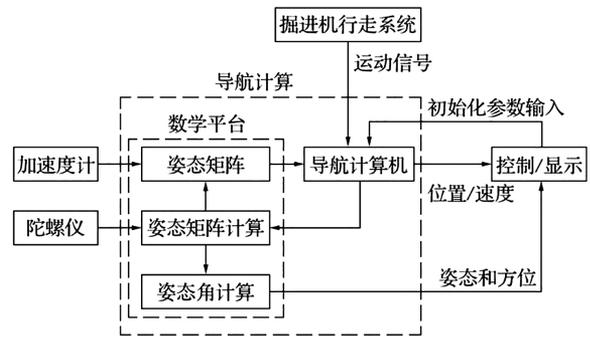
### 1.2 掘进机惯性导航技术

惯性测量技术由于其精度高、检测速度快被广泛用于井下掘进机位姿的检测和导航。该技术主要包括陀螺仪、加速度计、里程计、导航计算模块等惯性测量元件,是通过计算来实时确定掘进机位姿、自主式推算的导航系统。具体见图3(a):惯性测量系统通常由3组速率陀螺和加速度计正交安装组成,

每组加速度计在前、陀螺仪在后,分别安装在六面体上,再通过减振器或直接与掘进机固定连接。其中,陀螺仪用于测量掘进机三向运动的角速度  $\omega_{bib}=(\omega_{bxib}, \omega_{byib}, \omega_{bzib})$ ,加速度计则通过动态测量掘进机各方向上的力  $f_b=(f_{bx}, f_{by}, f_{bz})$  计算出运动加速度  $a_b=(a_{bx}, a_{by}, a_{bz})$ ,确定掘进机的实时位姿。



a 惯性测量原理



b 惯性导航系统示意图

图3 悬臂式掘进机惯性导航技术

如图3(b),掘进机惯性导航技术的初始化参数输入由“控制/显示”系统用于,然后传输给导航计算机系统,根据掘进机行走状态实时显示导航参数和界面,最后将计算所得的数据传递于悬臂式掘进机实现自主式的运动和截割控制。

## 2 零速修正技术的车载惯性导航系统

由于悬臂式掘进机在作业过程中存在低速、长时、移动距离短的特点,且对精度要求较高,达到厘米级。传统惯性导航技术在用于巷道掘进时在各方面仍面临较大挑战。

为了更好的改善掘进机导航系统的精度问题,卢志勇等人提出了零速修正技术。该技术通过利用惯性系统部件误差模型进行自动校正<sup>[5]</sup>,在保留惯性部件较强环境适应性优点的同时,实现了车载定位精度的提高,在掘进机惯性导航系统中有良好的应用前景。

#### 零速修正技术导航原理:

零速修正技术是一种误差补偿的校正技术,其提高系统精度的原理在于该技术可以有效消除惯性导航系统由于长时间作业而累积的误差。当悬臂式掘进机停车时,此时系统速度误差的观测量将以车体的惯性系统速度输出作为参照源,对掘进机导航系统的定位参数进行补偿校准。参考相关文献发现,利用停车点的速度作为测量依据,还可以对噪声及时间因素引起的相关误差源得到修正<sup>[5]</sup>。

零速修正技术的计算方式多种,使用方法最多的方法是二次曲线拟合法。该方法简单高效,可以在掘进机较短的停车间隔内精准高效地拟合出惯性导航系统速度误差曲线,再经过积分得到位置的误差曲线,最后与惯性导航系统的位置输出求和,计算得修正位置,表达式为:

$$v=a_0+a_1t+a_2t^2 \quad (1)$$

式中, $V$ ——停车时速度观测值; $a$ ——系数; $t$ ——停车时刻。

### 3 工业性试验

为了验证零速修正技术在悬臂式掘进机截割作业下的准确性和适用性,本次工业性试验将在山西兰花科技创业股份有限公司大阳煤矿分公司(以下简称大阳煤矿)进行,掘进设备为EBZ-160悬臂式掘进机。

#### 3.1 掘进机截割工艺

2017年7月,根据大阳煤矿采掘计划,开采的四

采区为3号煤层,为本井田第一层可采煤层,上下空间均无采空区分布。截割头由巷道一侧底部进刀深度400~600mm,然后在巷道内水平摆动截割,周边留煤200~300mm,每水平截割一次抬高400~600mm,按照截割曲线示意图连续摆动至初步成形,截割完一个循环后,修整周边达到设计要求,循环进尺为0.9m。

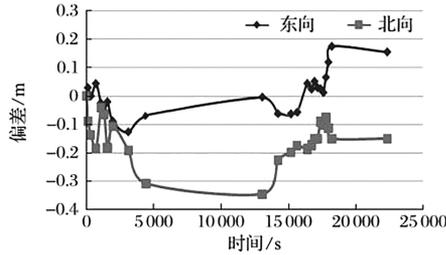
#### 3.2 试验过程

本次试验总设计时长为12.5h,分别对大阳煤矿EBZ-160掘进机在零速修正技术前使用前和使用后两种结果进行对比,试验内容包括空载和切割两种工况。掘进机启动时,行走系统将为零速修正技术提供零速信号,修正间隔设定在1.0min-1.5min;掘进机惯导系统的精准度的评测基准由全站仪测定的惯性导航位置决定,两种方案的对比由掘进机误差的位置偏差量决定,为提高试验精确性,选取北向偏差与东向偏移量为共同参考目标。

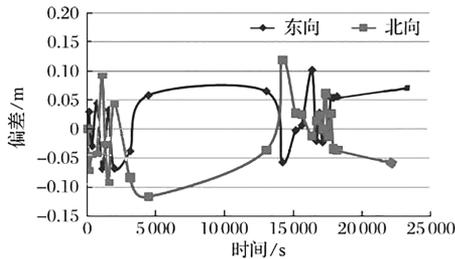
#### 3.3 试验结果

图4(a)(b)分别为掘进机惯导系统使用零速修正法前后,多向偏移误差随时间变化的示意图。两次试验中,共分四阶段进行,第一阶段为掘进机启动后的前1h,此时为掘进机空载运动。可以看出零速修正技术未介入时,掘进机每时间间隔的偏移误差介于+0.1至-0.2m之间,零速修正技术介入后,偏移误差稳定在+0.1至-0.1m之间,起到了一定的校正效果;第二阶段为1-4h,此时掘进机进入截割作业,分析认为受震动影响。未进行零速修正的掘进机惯道系统出现较大偏移,最大偏移量达到0.37m,零速修正后的掘进机偏移虽较空载运动时误差略有增加,但仍可控制在±0.15m之内,说明该技术对截割作业的作用更明显;第三阶段4-5.5h,为掘进机空载运动,控制效果与第一阶段结果相近;第四阶段5.5-6.25h,为掘进机第二次截割作业,惯导系统未进行零速修正时,东向偏移上升明显,总体误差量在±

0.2m。零速修正技术介入时,误差偏移回归在 $\pm 0.1\text{m}$ 之间。



(a)惯导系统未进行零速修正法



(b)惯导系统进行零速修正法

图4 惯导系统偏差趋势图

#### 4 结语

1)通过对悬臂式掘进机位姿及惯性导航技术的特点分析,惯导技术虽具有结构简单、测量精度高、

范围广的特点,但在低速、长时、短距离的井下作业时,存在精度差问题。加之悬臂式掘进机在作业中会出现侧滑、横摆、甩尾等情况,也会对悬臂式掘进机位姿测量产生误差。

2)零速修正技术是一种误差补偿的校正技术,可以有效消除惯性导航系统由于长时间作业而累积的误差。

3)根据大阳煤矿EBZ-160悬臂式掘进机的工业性试验,零速修正技术可将掘进机空载运动时的偏移误差控制在 $\pm 0.1\text{m}$ 以内;截割作业时的便宜误差控制在 $0.15\text{m}$ 以内,较传统惯导系统的精确性提升明显。

#### 参考文献:

- [1]黄日恒.悬臂式掘进机[M].徐州:中国矿业大学出版社,1996:22-65.
- [2]田原.悬臂式掘进机导航技术现状及其发展方向[J].工矿自动化,2017,43(8):37-43.
- [3]朱信平,李睿,高娟,等.基于全站仪的掘进机机身位姿参数测量方法[J].煤炭工程,2011,1(6):113-115.
- [4]陈哲.捷联惯性导航系统原理[M].北京:宇航出版社,1986.
- [5]卢志勇,杨先飞.零速校正在惯性导航系统中的仿真研究[J].应用科技,2009,36(6):45-48.

(上接第6页)

#### 参考文献:

- [1]闫明辉.岩石定向爆破数值模拟及装药优化[D].沈阳:沈阳理工大学,2014.
- [2]郑炳旭.中国爆破新技术Ⅲ[M].北京:冶金工业出版社,2012:659-681.
- [3]国家安全生产监督管理总局.爆破安全规程:GB6722-2014[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [4]罗勇,沈兆武.聚能爆破在岩石控制爆破中的研究[J].工程爆破,2005,11(3):3-17.
- [5]龚敏,王灿华,梁立勋,等.硬岩掘进中主要爆破参数的确定与作用[J].煤炭学报,2015,40(7):1526-1533
- [6]刘衍利,黎卫兵,黄星源.切顶卸压爆破技术在沿空

留巷中的应用[J].2016,45(6)132-133.

- [7]汤建泉,刘吉存,宋文军,王诗海,李伟涛.切顶卸压沿空留巷预裂切缝技术指标研究[J].煤炭技术,2017,36(06):174-176.
- [8]杨汉宏,薛二龙,罗文,宋立兵.神华集团切顶卸压自动成巷无煤柱开采技术的应用[J].煤炭科技,2015,(03):1-3.
- [9]杨相海,张杰,余学义.强制放顶爆破参数研究[J].西安科技大学学报,2010(03)287-290
- [10]陈上元,郭志飏,马资敏,等.城郊矿切顶聚能爆破参数优化研究[J].煤炭技术,2016,35(8):17-19.