

文章编号:1671-251X(2021)S2-0019-04

基于捷联惯导系统的采煤机定位方法

武俊, 刘瀚文

(国家能源集团乌海能源有限责任公司 机电动力部, 内蒙古 乌海 016000)

摘要:针对现有采煤机定位精度较低的问题,提出了一种基于捷联惯导系统的采煤机定位方法。首先建立采煤机参考坐标系,然后利用捷联惯导系统中的三轴加速度计和三轴陀螺仪实时测量采煤机的加速度和角速度信息,并根据四元数捷联惯导位姿解算方法解算出采煤机的实时位置和姿态信息,最后得到精确的采煤机运动轨迹,实现对采煤机的实时定位。该方法已在乌海能源有限责任公司老石旦煤矿应用,解决了老石旦煤矿现有采煤机定位系统中惯性零件出现漂移的问题,能够实现采煤机的实时精确定位,满足采煤机定位精度要求,提高了采煤效率。

关键词:采煤机定位;捷联惯导;三轴加速度计;三轴陀螺仪;加速度

中图分类号:TD632 文献标志码:A

Positioning method of shearer based on strapdown inertial navigation system

WU Jun, LIU Hanwen

(Mechanical and Electrical Power Department, CHN Energy Wuhai Energy Co., Ltd.,
Wuhai 016000, China)

0 引言

在综采工作面中,采煤机、液压支架、刮板输送机被称为综采“三机”。通常采煤机的机身骑在刮板输送机上,往复运动利用滚筒来截割煤壁。采煤机在工作时和液压支架联动,液压支架收护帮板,采煤机割煤,在采煤过程中需要实时对采煤机进行定位,进而控制液压支架及时收护帮板,若护帮板收回不及时,采煤机会割到护帮板,导致事故发生。现有的采煤机定位方法包括以下几种:① 采煤机齿轮计数法,该方法比较简便,容易实现,但定位不准确,同时精度低。② 采煤机红外对射定位法,该方法可靠性较差,无法实现实时定位。③ 无线传感器网络采煤机定位法,该方法由于射频信号在井下衰减指数较大,加之井下无线信道模型建立还不完整,无线定位模型误差较大。因此,需要一种能够实现采煤机精准定位的方法,并且能够在井下恶劣环境中应用。捷联惯导具有不依赖于任何外部信息,也不向外部辐射能量,隐蔽性好,可在空中、地面、水下等各种复杂环境下工作的特点,适用于井下恶劣环境。国内外学者对基于捷联惯导的采煤机动态定位开展了系

统深入的实验与工程应用研究。张斌等提出了基于陀螺仪和里程计的无人工作面采煤机自主定位系统,并在模拟实验中取得了较好的定位效果,然而里程计存在固有累计误差,制约了定位精度的提高。樊启高等利用捷联惯性导航系统建立了采煤机的位置定位模型,并对采煤机的截割路径进行了惯性导航仿真。吕振等基于捷联惯性导航进行了井下移动目标精确定位系统的研究,并且对传感器的误差进行了分析。

本文在上述文献的基础上,以乌海能源有限责任公司老石旦煤矿为应用背景,提出了一种基于捷联惯导系统的采煤机定位方法,解决了老石旦煤矿现有采煤机定位系统中惯性零件出现漂移的问题,提高了采煤机的定位精度。

1 捷联惯导系统原理

捷联惯导系统是采煤机普遍用到的定位技术,其工作原理是在采煤机上连接加速度计以及陀螺仪对采煤机的旋转角度、速度以及加速度矢量进行测量,测量到的旋转角度、速度以及加速度是采煤机处于相对于惯性坐标系条件下的数据,以初始状态载

收稿日期:2021-02-01;责任编辑:张强。

作者简介:武俊(1981—),男,内蒙古乌兰察布人,工程师,工程硕士,主要研究方向为煤矿智能化建设,E-mail:10777474@chnenergy.com.cn。
通信作者:刘瀚文(1990—),男,山西平遥人,工程师,硕士,主要研究方向为煤矿智能化建设,E-mail:hanwen.liu@chnenergy.com.cn。

体处于的位置、姿态和速度为基准,对任意时间采煤机在同等条件下的角度、位置和速度加以计算。加速度在一次积分之后就能得出采煤机的速度,经过二次积分能获得其位置。采煤机的速度、位置和姿态需要在不同的坐标系下转换并通过解算姿态矩阵得出。

惯导系统由 3 个线性加速度计和三轴陀螺仪组成,当需要对加速度进行积分来获知采煤机的位置姿态信息时,一定要以某一参考坐标系为条件,因此应掌握各空间的坐标系并加以定义才能进一步研究、分析定位技术。惯导系统的解算基础是惯性定律,也就是牛顿力学。从地球坐标系、导航坐标系、惯性坐标系以及采煤机坐标系相互的关系中能获得导航数据。

(1) 地球坐标系和地球相关联,相对于惯性坐标系,围绕着地球自转角速率进行旋转, Y_e 与 X_e 处于赤道平面内,轴 Y_e 指向的是 90°E ,轴 X_e 指向的是格林尼治经线,轴 Z_e 为垂直于地球。地球坐标系如图 1 所示。

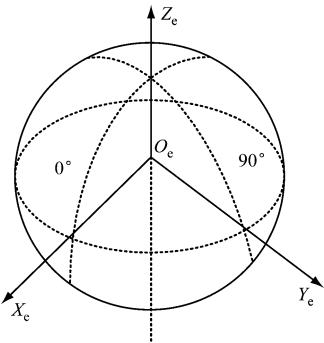


图 1 地球坐标系

(2) 导航坐标系用 N 系表示,如图 2 所示。采煤机位置所包含的东北天方向由此坐标系表示。采煤机的位置用原点 O_n 来表示, X_n 表示东, Y_n 表示北, Z_n 表示天。

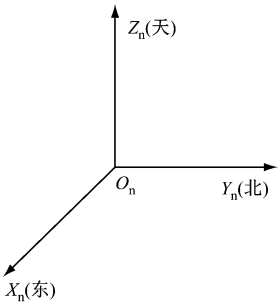


图 2 导航坐标系

(3) 惯性坐标系简称 I 系,如图 3 所示。将地球的中心位置用 O_i 表示,即坐标系中的原点, Z_i 指北极方向地轴, X_i 和 Y_i 处于赤道平面内,组成了右手坐标系,用于测量惯性元件。

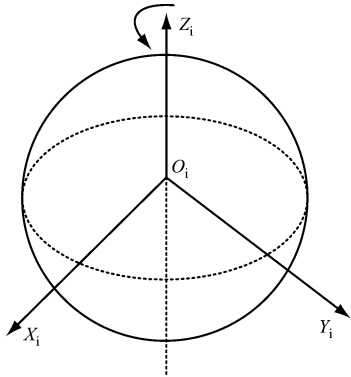


图 3 惯性坐标系

(4) 采煤机坐标系即 B 系,如图 4 所示。采煤机的重心处是圆点,用 O_b 表示,轴 Y_b 表示推进的方向,轴 X_b 表示牵引的方向,轴 Z_b 表示向上竖轴。

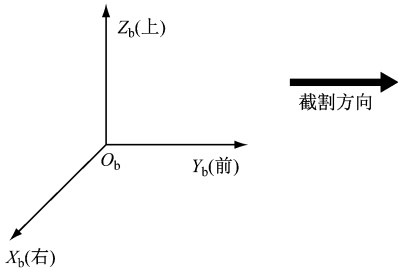


图 4 采煤机坐标系

(5) 采煤机姿态包括横滚角 γ 、俯仰角 θ 、航向角 ψ ,如图 5 所示。导航坐标系与采煤机坐标系两者的转角能确定这几个角度。横滚角 γ :运载体立轴与纵轴所在铅垂面之间的夹角,当运载体向右倾斜时角度定义为正,角度范围为 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 或 $(-\pi, \pi]$ 。俯仰角 θ :运载体纵轴与其水平投影线之间的夹角,当运载体抬头时角度定义为正,角度范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 或 $[-\pi/2, \pi/2]$ 。航向角 ψ :运载体纵轴在当地水平面上的投影线与当地地理北向的夹角,常取北偏东为正,即若从空中俯视运载体,地理北向顺时针旋转至纵轴水平投影线的角度,角度范围为 $0 \sim 360^\circ$ 或 $[0, 2\pi)$ 。

2 基于捷联惯导系统的采煤机定位方法

在自动化开采当中,采煤机是至关重要的设备,要发挥采煤机的自动化优势,就需要将自动化融入刮板输送机、液压支架以及采煤机中,使三者配合工作,煤矿综采工作面“三机”工作示意如图 6 所示。监测采煤机的位置极其重要,利用位置监测来采集采煤机的工作状态,同时对采煤机位置关系加以计算,将其运行轨迹准确地预测出来,从而优化采煤机和其他设施的联合工作,满足斜切进刀、跟机作业以及调直等方面的作业需求,从而减少采煤用人数,甚至实现无人自动化采煤。在综采工作面中,采煤机的主要作用是装煤及落煤,利用滚筒截割煤壁来

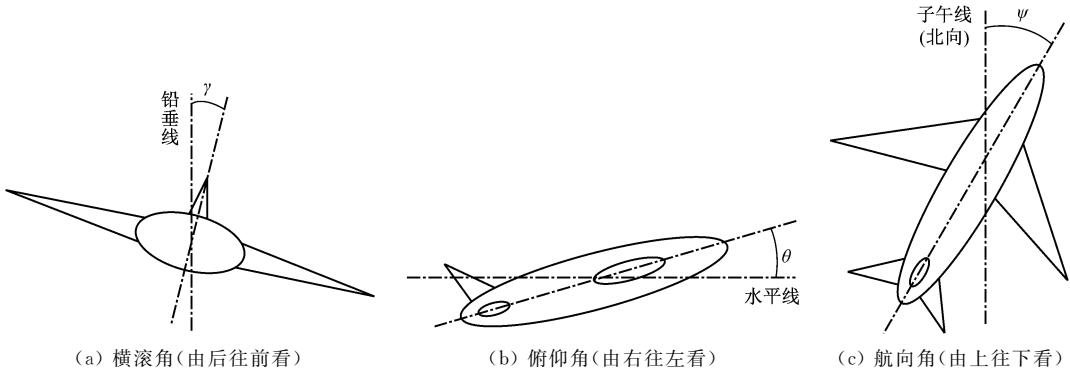


图 5 横滚角、俯仰角、航向角

实现把煤放到刮板输送机上,再利用转载机和带式输送机把煤送出。在采煤机工作过程中,随着采煤机位置的变化,液压支架实时移动刮板输送机的位置实现联动。在采煤机割完一刀煤之后,接着要采用斜切进刀。端部斜切进刀、中部斜切进刀是当前常用的进刀方法。端部斜切进刀指的是在进刀时从端部进入,按照一定的截深长度实施斜切至煤壁,接着按照工作面的路线继续前进,等到全部进入之后割出三角煤,之后再继续进行这一截割步骤。

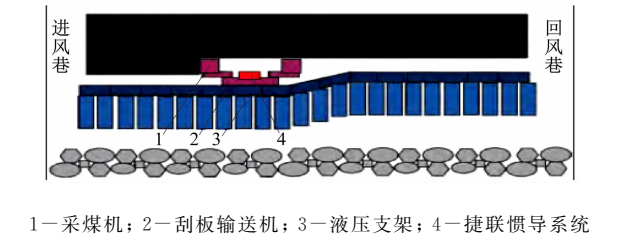
三维空间中有着任意的姿态,并且根据工作环境时刻变化,造成其行走轨迹也会不一样。想要完善采煤机、刮板输送机和液压支架的自动化协作配合,就需要对采煤机的姿态以及位置加以精准测量。将捷联惯导系统安装在采煤机上,加速度计获得加速度信息,陀螺仪获取采煤机实时的姿态数据,就可对采煤机的动态位置进行预测和计算。

基于捷联惯导系统的采煤机定位方法步骤如下:

- (1) 建立参考坐标系。
- (2) 利用姿态矩阵解算姿态角,得出角速度。
- (3) 对各个方向的加速度积分,得到采煤机移动位置和姿态,从而对采煤机进行定位。

2.1 捷联惯导系统坐标系建立

捷联惯导系统要计算出采煤机位置姿态等方面的信息就必须转换坐标系来进行数学计算。① 以采煤机的重心为坐标的圆心,按照东北天方向建立导航坐标系。② 以采煤机的质心作为中心,轴 Y_b 是采煤机前进的方向,从平面俯视和该轴垂直的是轴 X_b ,轴 Z_b 在和平面垂直方向,建立采煤机坐标系(B系)。采煤机捷联惯导系统坐标系如图 7 所示。



1—采煤机; 2—刮板输送机; 3—液压支架; 4—捷联惯导系统

图 6 煤矿综采工作面“三机”工作示意

采煤机作业时,工作面的移动方向和刮板输送机的移动方向会使采煤机的位置发生变化,煤层的高度也会使采煤机的位置发生变化。煤层的走向、工作面倾斜角度及斜切时进刀的变化都会引起采煤机姿态和位置发生改变。采煤机在工作过程中,在

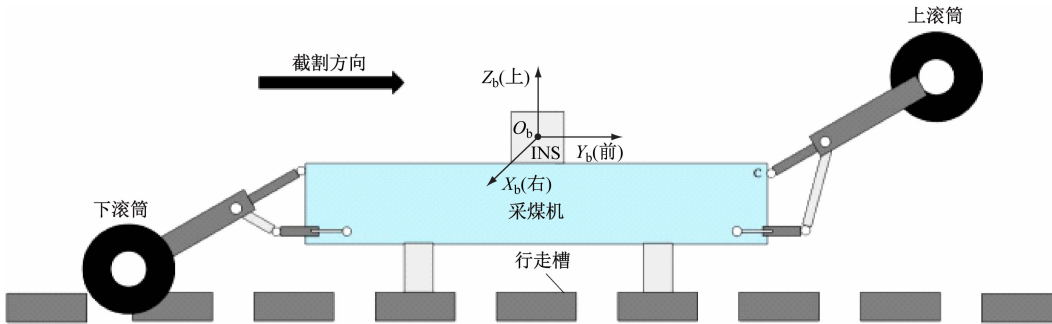


图 7 采煤机捷联惯导系统坐标系

2.2 位姿解算

利用采煤机的姿态角通过三角函数可以得到采煤机的姿态变换矩阵。通过数学计算将采煤机载体坐标系上的矢量变换到导航坐标系中,得到姿态矩阵。根据姿态角描述的姿态矩阵,可以实时解算出采煤机的姿态角,从而使测量的数据值变为实际数

值。利用捷联惯导系统来对位置姿态进行解算。解算姿态矩阵常用的方法有四元数法和欧拉角法。两者相比较而言,欧拉角法能直接解算出航向角、横滚角以及俯仰角,同时用到的算式不多。故本文采用欧拉角法对姿态矩阵进行解算。

运用欧拉角法对姿态矩阵进行解算的方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \frac{1}{\cos \theta} \begin{bmatrix} -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \\ \cos \gamma \cos \theta & 0 & \sin \gamma \cos \theta \\ \sin \theta \sin \gamma & \cos \theta & -\sin \theta \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 为采煤机坐标系中的各轴角速度。

对各个方向的加速度做二次积分,就能将采煤机在此方向固定时间内的前进路程计算出来。由此获知了姿态角和距离,就能得到采煤机的移动位置和姿态,进而进行定位。

3 基于捷联惯导系统的采煤机姿态调整方法

将捷联惯导应用在采煤机定位上,实时调整采煤机姿态和截割高度,为综采工作面“三机”协同自动化提供实践支持。

3.1 采煤机姿态确定

采煤机机身倾斜的角度、滚筒高度以及摇臂运动时的角度是采煤机姿态的表现。当利用捷联惯导系统获取采煤机具体定位的同时,也能够获取其倾角的数据。在采煤机摇臂上安装传感器,就能够获知摇臂的角度。滚筒高度的良好控制对采煤机截割非常重要,当底板角度不同时,将滚轮调至适当的高度来保证采煤机截割的正常操作。

3.2 采煤机截割高度调整方法

当采煤机在进行割煤作业时,每一刀的形状都会发生细微的不同,这就需要实时获知采煤机纵向、横向的切角,才能对割煤高度做出及时调整。利用传感器测量出采煤机的横滚角和俯仰角,之后根据摇臂角度和机身角度的关系来计算得到采煤机的倾角和截割之间的具体关系,从而实现实时调节。

4 结论

(1) 基于捷联惯导系统的采煤机定位方法通过捷联惯导系统获得采煤机的位置以及运动数据,并

通过欧拉角法计算求解到采煤机位置和姿态进行实时定位。在采煤机运行过程中,捷联惯导系统能够实时对采煤机的姿态和运动轨迹进行跟踪,提高了采煤机位置定位精度,满足了煤矿井下采煤机定位要求。该定位方法已在乌海能源有限责任公司老石旦煤矿得到应用,能使采煤机更准确定位、高效采煤,提高了该煤矿的生产效率。

(2) 基于捷联惯导系统的采煤机定位方法也存在一定的不足,由于采煤机恶劣的工作环境和复杂的干扰,再加上捷联惯导本身存在的加速度累计误差对系统的定位精度影响很大,下一步研究内容主要为采煤机捷联惯导的振动误差补偿和利用外部定位技术进行数据融合。

参考文献:

[1] 鲁程. 采煤机多惯导冗余定位精度提升方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.

[2] 杨海,李威,罗成名,等. 基于捷联惯导的采煤机定位姿技术实验研究[J]. 煤炭学报,2014,39(12): 2550-2556.

[3] 张露. 基于捷联惯导的采煤机位姿解算算法研究[D]. 西安:西安科技大学,2014.

[4] 张庆,王学文,谢嘉成,等. 基于捷联惯导系统的采煤机定位与姿态调整[J]. 工矿自动化,2017,43(10): 83-89.

[5] 张博渊. 采煤机动态精准定位方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2017.

[6] 张斌,方新秋,邹永洺,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.

[7] 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.

[8] 吕振,刘丹,李春光. 基于捷联惯性导航的井下人员精确定位系统[J]. 煤炭学报,2009,34(8):1149-1152.