



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

张子悦,符世琛,刘超,等.基于多感知方式组合测量的采煤机位姿检测系统研究[J].煤炭科学技术,2021,49(11):218-224. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.11.028

ZHANG Ziyue, FU Shichen, LIU Chao, et al. Position detection system of shearer based on combined measurement of multiple sensing modes [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11): 218 - 224. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.11.028

基于多感知方式组合测量的采煤机位姿检测系统研究

张子悦,符世琛,刘超,李永泽,兰玉,吴淼

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院,北京 100083)

摘要:近年来我国煤矿井下瓦斯爆炸、透水等安全事故频发,严重威胁矿工生命安全。为实现煤矿井下综采工作面采煤机位姿无人化、高精度检测,改善矿工的工作环境,提高煤矿机械化、自动化程度,对比了现有的检测综采工作面上采煤机实时位姿的技术方法,提出了一种基于多感知方式组合测量的采煤机位姿检测系统,该系统采用全站仪和 UWB(Ultra Wide-band)定位系统组合测量采煤机的空间位置坐标,采用倾角传感器和寻北仪组合测量采煤机的姿态角(航向角、横滚角、俯仰角);建立了系统的三维模型,将全站仪安装在区段运输平巷与运输上山的交点处,将 UWB 固定基站群安装至综采工作面与区段运输平巷交点的转载机处。为实现 UWB 移动基站移站时的自主标定,液压支架顶端和底端分别安装 UWB 模块,将 UWB 定位节点安装至采煤机机身,将倾角传感器和寻北仪安装至采煤机机身。推导了全站仪与 UWB 固定基站群的坐标的测量方法,UWB 定位系统基于 TOA(Time of Arrival)定位模型的 CT(Caffery-Taylor)算法以及全站仪坐标系与 UWB 固定基站群坐标系间的坐标变换矩阵。详细介绍了采煤机倾角传感器和寻北仪的系统结构和工作原理,分析了该系统在实际应用中的受限因素,并简要提出了相应的改善方案。该系统理论上可实现采煤机在综采工作面中的实时位姿检测,为系统仿真分析和实验平台搭建提供了理论参考。

关键词:采煤机;组合测量;位姿检测;全站仪;UWB 系统;倾角传感器;寻北仪

中图分类号:TD421

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)11-0218-07

Position detection system of shearer based on combined measurement of multiple sensing modes

ZHANG Ziyue, FU Shichen, LIU Chao, LI Yongze, LAN Yu, WU Miao

(School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In recent years, safety accidents such as underground gas explosions and water penetration have occurred frequently, seriously threatening the lives of miners. In order to achieve the unmanned and high-precision detection of the shearer's position in the fully mechanized coal mining face, improve the working environment of the miners, and increase the mechanization and automation of the coal mine, the real-time position of the coal mining machine in the existing comprehensive mining face was compared. Based on the technical method of attitude, a coal shearer attitude detection system based on combined measurement of multiple sensing methods was proposed. This system uses a combination of a total station and UWB (Ultra Wide-band) positioning system to measure the spatial position coordinates of the shearer. A combination of inclination sensor and a north seeker was used to measure the attitude angle (heading angle, roll angle, and pitch angle) of the shearer. In this paper, a three-dimensional model of the system was established. The total station was installed at the intersection of the section transportation lane and the transportation uphill, and the UWB fixed base station group was installed at the transfer machine at the intersection of the fully-mechanized working face and the section transportation lane. In order to realize the autonomous calibration of the UWB mobile base station when it moves, the UWB modules were installed at the top and bottom of the hydraulic

收稿日期:2021-06-12;责任编辑:周子博

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2019M660860);国家自然科学基金资助项目(51874308,U1610251)

作者简介:张子悦(1996—),男,河北沧州人,硕士研究生。E-mail:zziyue96@163.com

通讯作者:符世琛(1991—),男,河北邢台人,博士后。E-mail:fushichen0526@163.com

support, the UWB positioning node was installed on the shearer body, and the inclination sensor and the north finder were installed on the shearer body. The measurement method of the coordinates of the total station and the UWB fixed base station group was deduced, and the CT (Caffery-Taylor) algorithm of the UWB positioning system based on the TOA (Time of Arrival) positioning model was deduced. The coordinate transformation matrix between the total station coordinate system and the UWB fixed base station group coordinate system was also calculated. The system structure and working principle of shearer inclination sensor and north finder were introduced in detail. The limited factors of this system in practical application were analyzed, and corresponding improvement schemes were briefly proposed. This system can theoretically realize the real-time posture and attitude detection of the shearer in the fully mechanized working face, which provides a theoretical reference for simulation analysis and experimental platform construction.

Key words: shearer; combined measurement; pose detection; total station; UWB system; inclination sensor; north finder

0 引 言

无人采掘装备是当前国际煤炭领域的发展前沿^[1]。采煤机是井下综采工作面的核心设备,综采工作面的工况非常复杂,常存在高温高灰尘以及其他的干扰情况,导致驾驶员操控采煤机作业难以保证精度,采煤效率大幅降低,采煤机的位姿检测是实现采煤机无人化、自动化的关键。近年来,已有多位学者对采煤机的位姿检测进行了研究:张博渊^[2]提出了捷联惯导系统与里程计相融合的采煤机定位技术,分析了影响采煤机定位精度的因素,建立了最优估计误差补偿模型,但惯导会产生较大的累积误差;方新秋等^[3]提出了微机械陀螺和加速度计传感器组合自主定位系统的技术,根据采煤机的运动特征建立了动力学模型,仿真结果表明惯性传感器的误差是导致自主定位系统精度低的主要因素;李振平^[4]提出了运用电子地图显示采煤机位置的技术,通过采煤机在巷道中的投影以及简单的数学计算,可消除采煤机定位系统计算过程中的累积误差;郝尚清等^[5]提出了以采区坐标系作为参考坐标来确定采煤机坐标的技术,将此技术应用到采煤机自动调高和工作面自动调直中,但并未测得采煤机的姿态角。目前的采煤机位姿检测方法仅能获取采煤机的局部坐标系坐标,无法获取绝对坐标系坐标,所以无法满足采煤机定位的精度要求。

全站仪具有数据处理快速准确、定方位角快捷和快速自动测距的优点,可满足检测采煤机位姿实效性和精度的要求。UWB 定位技术通过检测超宽带信号波到达时间来解算距离^[6-8],可以减小井下高温高灰尘工作环境对采煤机定位检测精度的影响。将寻北仪和倾角传感器安装至采煤机机身,寻北仪和倾角传感器是完全独立自主的,可测出采煤机的姿态角^[9-10]。

笔者基于多种感知方式提出了一种采煤机的位姿检测方法,运用全站仪与 UWB 定位系统,对采煤机的空间坐标进行组合测量。运用倾角传感器和寻

北仪测量采煤机的姿态角。重点介绍了 UWB 定位系统基于 TOA 定位模型的 CT 算法,推导了 UWB 固定基站群坐标系与全站仪坐标系间的坐标变换矩阵,介绍了倾角传感器和寻北仪测量采煤机姿态角的工作原理,分析了该系统在实际应用中的误差来源,提出了相应的改善方案。

1 多感知方式组合测量系统结构

为实现采煤机的位姿检测,提出了一种基于多感知方式组合测量的采煤机远程位姿检测系统,采煤机位姿检测系统布置如图 1 所示。

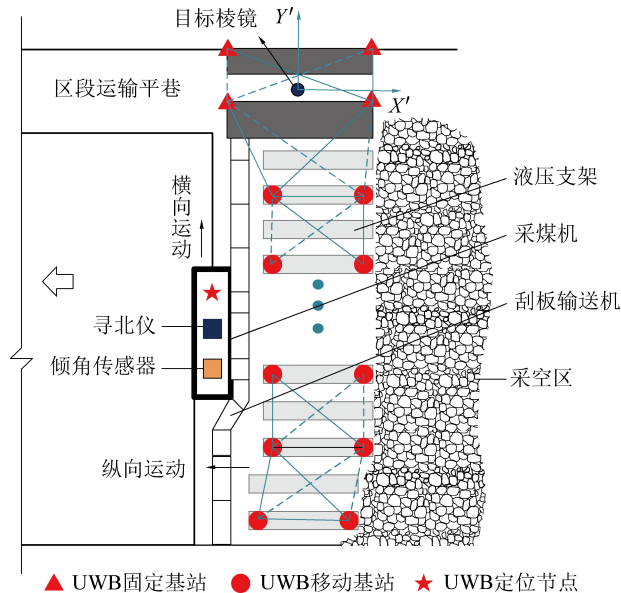


图 1 采煤机位姿检测系统布置

Fig.1 Shearer position and attitude detection system layout

本系统根据综采工作面不同的环境,设计了不同的检测方法,一定程度减小了环境对采煤机位姿检测精度的影响。区段运输平巷光照充足、粉尘少,但巷道狭长,不便采用 UWB 定位系统定位,故采用全站仪对 UWB 固定基站群定位。综采工作面工况复杂,采煤机工作时液压支架需移动,UWB 定位较为灵活,基站之间可实现自主连续标定,故采用 UWB 定位系统对 UWB 定位节点定位。采用 UWB

系统解算采煤机的姿态角需 3 个定位节点,解算过程会产生累积误差,影响测量精度,故采用倾角传感器和寻北仪,通过仪器内部数据处理直接测得采煤机的姿态角。

采煤机位姿检测系统结构如图 2 所示,将 UWB 定位系统固定基站群安装在综采工作面与运输平巷交点处,为实现 UWB 移动基站移站时的自主标定,液压支架的顶端和底端分别安装 UWB 模块,安装 UWB 模块的液压支架和未安装 UWB 模块的液压支

架间隔布置。将全站仪安装在运输上山与区段运输平巷处,以全站仪为采煤机位姿检测系统的定位基点,建立大地绝对坐标系,由地测人员进行坐标标定。将寻北仪、倾角传感器及 UWB 定位节点安装至采煤机机身,根据采煤机型号的尺寸规格可将定位节点安装在机身上部或侧部,将 UWB 定位节点安装在采煤机坐标系中便于测量且振动较小的位置,由于 UWB 信号易受非视距传播的影响,须保证定位节点与液压支架上的 UWB 基站视距传播。

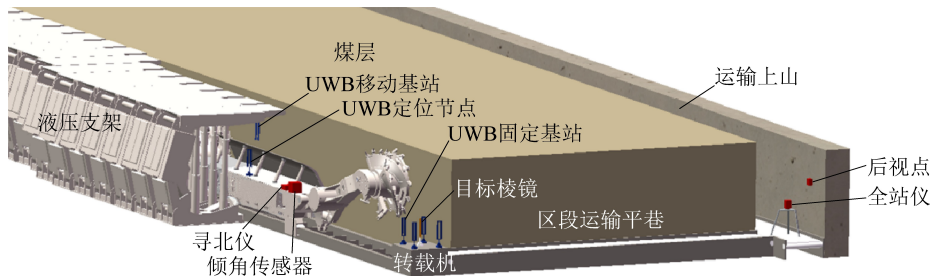


图 2 采煤机位姿检测系统结构

Fig.2 Shearer position and attitude detection system structure

采煤机位姿检测系统原理如图 3 所示,本系统采用 UWB 定位技术测量 UWB 定位节点在 UWB 固定基站群坐标系中的坐标位置,采用全站仪技术测量 UWB 固定基站群在定位基点坐标系中的坐标位

置。当采煤机工作时,截割头载荷的变化会导致采煤机机身振动,从而引起采煤机采煤方向以及自身水平方向的变化,采用倾角传感器测量采煤机的横滚角和俯仰角,采用寻北仪测得航向角。

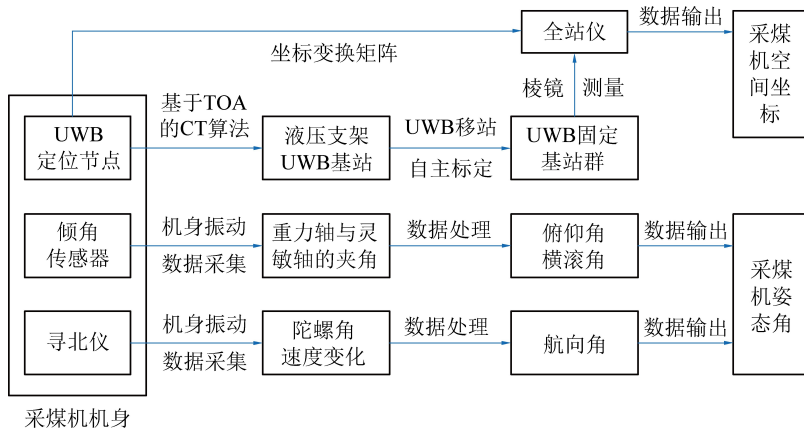


图 3 采煤机位姿检测系统原理

Fig.3 Schematic of shearer posture detection system

2 采煤机的位置检测系统

2.1 全站仪检测系统

由于区段运输平巷空间狭窄、距离长、不使用 UWB 系统定位,笔者采用全站仪对 UWB 固定基站群进行空间定位,全站仪的三维坐标测量原理如图 4 所示。根据区段运输平巷的服务年限,由地测人员每隔半年到一年对设站点进行坐标标定,将设站点坐标 $C(x_c, y_c, z_c)$ 作为测站点的绝对坐标,以此坐标为基准建立空间坐标系,输入后视点 B 的绝对

坐标 $B(x_b, y_b, z_b)$ 。

已知全站仪 C 到目标点 A 的距离为 S_{AC} ,待定边 AC 的垂直角为 α_1 ,则全站仪 C 到目标点 A 的平距^[11]为

$$D_{AC} = S_{AC} \cos \alpha_1$$

已知边 BC 的方位角为 α_{BC} ,待定方向与已知方向的水平角为 α_{AB} ,全站仪 C 的高程为 H_C ,则目标点 A 的三维坐标为

$$\begin{cases} x_A = x_C + D_{AC} \cos(\alpha_{AB} + \alpha_{BC}) \\ y_A = y_C + D_{AC} \sin(\alpha_{AB} + \alpha_{BC}) \\ z_A = H_C + S_{AC} \sin \alpha_1 \end{cases}$$

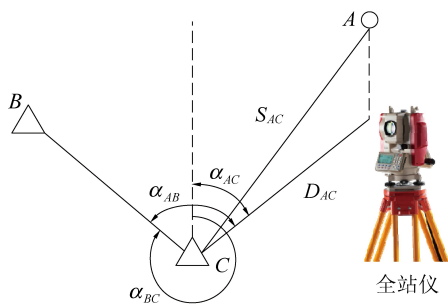


图4 全站仪及坐标测量

Fig.4 Total station coordinate measurement chart

根据全站仪的性能,可以快捷地测出目标点 (x_A, y_A, z_A) 的坐标位置以及角度,从而可推导出全站仪坐标系与UWB固定基站群坐标系之间的坐标变换矩阵。

2.2 UWB定位系统

UWB技术通过检测超宽带信号波到达时间来解算距离,可以减小井下高温高灰尘工作环境对采煤机定位检测精度的影响,UWB基站布置示意图5所示。UWB定位技术具有传输速率高、穿透力强、实时性好等优点,为实现UWB基站的自主连续标定,顶端和底端分别安装UWB基站的液压支架与未安装基站的液压支架间隔布置,通过各个UWB基站之间的信号传输,将UWB定位节点的坐标位置传输至UWB固定基站群^[12-14]。

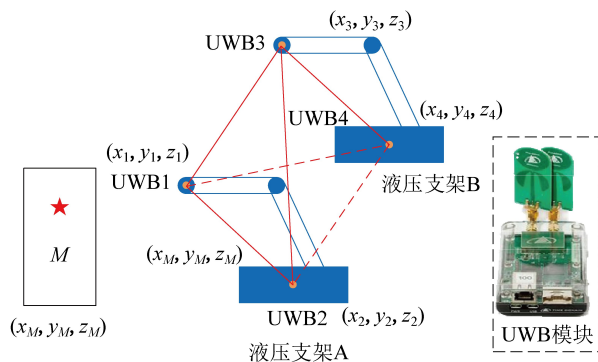


图5 UWB模块及基站布置示意

Fig.5 UWB base station layout diagram

根据采煤机机身定位节点与定位基站群之间的超宽带信号飞行时间参量建立TOA定位模型。通过测量采煤机机身定位节点到个基站的空间直线距离,利用“在测量无误差的条件下,目标一定位于以各个定位基站为核心,以测量距离为半径的球面上”这一几何特征^[15-16],4个球位置面相交的交点就是采煤机机身定位节点的空间位置坐标。

根据TOA定位模型建立了将Caffery算法和Taylor级数法相结合的算法,利用Caffery算法确定一个初始点坐标^[17],进而使用Taylor级数展开法进行迭代消除误差^[18-20],可精确确定采煤机在空间内

的坐标位置。

假设采煤机机身定位节点为M点,坐标为 (x_M, y_M, z_M) ,安装在液压支架的4个基站分别为1,2,3,4,坐标为 (x_i, y_i, z_i) ($i=1,2,3,4$),则基站i与定位节点M的空间距离为 d_{iM} 。

基站1,2,3,4与定位节点M之间的TOA定位观测方程组为

$$\begin{cases} (x_M - x_1)^2 + (y_M - y_1)^2 + (z_M - z_1)^2 = d_{1M}^2 \\ (x_M - x_2)^2 + (y_M - y_2)^2 + (z_M - z_2)^2 = d_{2M}^2 \\ (x_M - x_3)^2 + (y_M - y_3)^2 + (z_M - z_3)^2 = d_{3M}^2 \\ (x_M - x_4)^2 + (y_M - y_4)^2 + (z_M - z_4)^2 = d_{4M}^2 \end{cases} \quad (1)$$

面向采煤机的超宽带位姿检测系统的Caffery定位算法如下,使式(1)中的第n个方程减去第n+1个方程,得到关于 (x_M, y_M, z_M) 线性方程组:

$$\begin{cases} (x_2 - x_1)x_M + (y_2 - y_1)y_M + (z_2 - z_1)z_M = \\ \frac{1}{2}(x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 + z_2^2 - z_1^2 + d_{1M}^2 - d_{2M}^2) \\ (x_3 - x_2)x_M + (y_3 - y_2)y_M + (z_3 - z_2)z_M = \\ \frac{1}{2}(x_3^2 - x_2^2 + y_3^2 - y_2^2 + z_3^2 - z_2^2 + d_{2M}^2 - d_{3M}^2) \\ (x_4 - x_3)x_M + (y_4 - y_3)y_M + (z_4 - z_3)z_M = \\ \frac{1}{2}(x_4^2 - x_3^2 + y_4^2 - y_3^2 + z_4^2 - z_3^2 + d_{3M}^2 - d_{4M}^2) \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)中计算得出的 (x_M, y_M, z_M) 作为对M点的初始估计值,其与估计值 (x_{M0}, y_{M0}, z_{M0}) 的误差设为: $\delta_x, \delta_y, \delta_z$,则有:

$$\begin{cases} x_{M0} = x_M + \delta_x \\ y_{M0} = y_M + \delta_y \\ z_{M0} = z_M + \delta_z \end{cases} \quad (3)$$

将式(1)在 (x_M, y_M, z_M) 点用Taylor级数展开,并忽略二次及以上项,整理可得:

$$\begin{cases} (x_M - x_1)\delta_x + (y_M - y_1)\delta_y + (z_M - z_1)\delta_z = \\ \frac{1}{2}[d_{1M}^2 - (x_M - x_1)^2 - (y_M - y_1)^2 - (z_M - z_1)^2] \\ (x_M - x_2)\delta_x + (y_M - y_2)\delta_y + (z_M - z_2)\delta_z = \\ \frac{1}{2}[d_{2M}^2 - (x_M - x_2)^2 - (y_M - y_2)^2 - (z_M - z_2)^2] \\ (x_M - x_3)\delta_x + (y_M - y_3)\delta_y + (z_M - z_3)\delta_z = \\ \frac{1}{2}[d_{3M}^2 - (x_M - x_3)^2 - (y_M - y_3)^2 - (z_M - z_3)^2] \\ (x_M - x_4)\delta_x + (y_M - y_4)\delta_y + (z_M - z_4)\delta_z = \\ \frac{1}{2}[d_{4M}^2 - (x_M - x_4)^2 - (y_M - y_4)^2 - (z_M - z_4)^2] \end{cases} \quad (4)$$

对式(4)进行重复迭代计算,当 $|\delta_x| + |\delta_y| + |\delta_z|$ 小于设定的门限时,则停止迭代,采煤机机身定位节点 M 的最终估计值 (x_{M1}, y_{M1}, z_{M1}) 为

$$\begin{cases} x_{M1} = x_M + \delta_x \\ y_{M1} = y_M + \delta_y \\ z_{M1} = z_M + \delta_z \end{cases}$$

运用 CT 算法以同样原理可算出位于液压支架顶端和底端的各个 UWB 基站的坐标位置,最终计算出采煤机机身定位节点在 UWB 固定基站群所建立的坐标系中的空间坐标位置。

2.3 坐标系间的变换矩阵

已知采煤机机身定位节点 M 在 UWB 固定基站群坐标系中的坐标为 (x_M, y_M, z_M) ,通过全站仪的测

量已知由全站仪坐标系 $OXYZ$ 到 UWB 固定基站群坐标系 $O'X'Y'Z'$ 沿 X 轴移动了 d_x ,沿 Y 轴移动了 d_y ,沿 Z 轴移动了 d_z ,绕 X 轴旋转了 θ 角,绕 Y 轴旋转了 α 角,绕 Z 轴旋转了 γ 角,坐标系变换如图 6 所示,则两坐标系之间的旋转矩阵为式(5)。由于两坐标系间沿 X 轴移动了 d_x ,沿 Y 轴移动了 d_y ,沿 Z 轴移动了 d_z 距离,所以两坐标系之间的变换矩阵为式(6)。

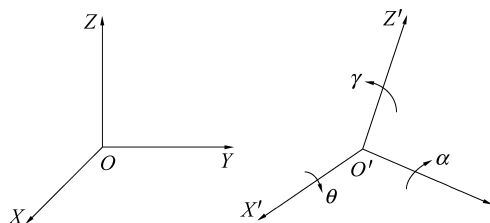


图 6 坐标系变换

Fig.6 Transformation of coordinate system

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \gamma & -\cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha & d_x \\ \sin \theta \sin \alpha \cos \gamma + \cos \theta \sin \gamma & -\sin \theta \sin \gamma \sin \alpha + \cos \theta \cos \gamma & -\sin \theta \cos \alpha & d_y \\ -\sin \alpha \cos \theta \cos \gamma + \sin \theta \sin \gamma & \sin \alpha \cos \theta \sin \gamma + \cos \gamma \sin \alpha & \cos \theta \cos \alpha & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

3 采煤机姿态检测系统

3.1 倾角传感器结构及工作原理

倾角传感器将所有模块集中至小电路板,其中包括微控制单元、加速度计、数模转换电路以及通信单元,可直接输出所要测量的角度。

倾角传感器运用了牛顿第二定律,在一个系统内部可测量出加速度,根据初速度和加速度,可通过积分计算出线速度。当倾角传感器在水平状态时,没有横向和垂直的加速度,只有一个重力加速度,重力垂直轴与灵敏轴之间的夹角为倾斜角。

“固体摆”式精度更高,应用较为广泛,其工作原理如图 7 所示。系统由支架、摆锤和摆线组成,摆锤受重力 G 和拉力 T 的作用, β 为摆线与重力方向的夹角,则所受合外力为

$$F = G \sin \beta = mg \sin \beta$$

则有

$$\beta = \arcsin \frac{F}{G}$$

在小角度测量范围测量时,可认为合外力 F 和夹角 β 呈线性关系,“固体摆”式传感器便基于此原理。在实际应用中,倾角传感器的测量精度易受振动的影响,故将倾角传感器安装至机身振动相对较

小的位置,并在下一阶段研究中设计减震装置。

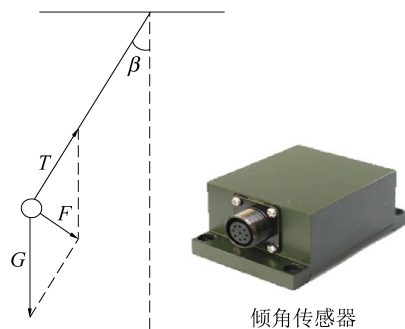


图 7 “固体摆”式倾角传感器原理

Fig.7 “Solid pendulum” tilt sensor principle

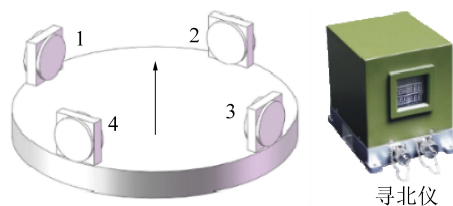


图 8 寻北仪及其测角示意

Fig.8 North finder metering diagram

3.2 寻北仪结构及工作原理

陀螺寻北仪是由双自由度动力调谐陀螺,机械转动装置和信号解算电路组成的,是一种利用陀螺原理测定地球自转角速率在当地真北方位的惯性测量系统。

寻北仪测角如图8所示,在寻北过程中,将陀螺置于动基座上,测出陀螺在位置1处的角速度 ω_1 ,假设初始方向与真北方向的夹角为 ψ ,地球自转速率为 ω_e ,地球自转在陀螺敏感轴的投影速度为 $\omega_e \cos \varphi$,陀螺输出的零点漂移为 $\varepsilon(t_1)$,则有

$$\omega_1 = \omega_e \cos \varphi \cos \psi + \varepsilon(t_1) \quad (7)$$

转动基座 90° 到达位置2处,陀螺在位置2处的角速度 ω_2 ,陀螺输出的零点漂移为 $\varepsilon(t_2)$,则有

$$\omega_2 = \omega_e \cos \varphi \cos(\psi + 90^\circ) + \varepsilon(t_2) \quad (8)$$

在转动基座 90° 到达位置3处,陀螺在位置3处的角速度 ω_3 ,陀螺输出的零点漂移为 $\varepsilon(t_3)$,则有

$$\omega_3 = \omega_e \cos \varphi \cos(\psi + 180^\circ) + \varepsilon(t_3) \quad (9)$$

在转动基座 90° 到达位置4处,陀螺在位置4处的角速度 ω_4 ,陀螺输出的零点漂移为 $\varepsilon(t_4)$,则有

$$\omega_4 = \omega_e \cos \varphi \cos(\psi + 270^\circ) + \varepsilon(t_4) \quad (10)$$

在短时间内可将陀螺的零点漂移设为常量,即 $\varepsilon(t_1) = \varepsilon(t_2) = \varepsilon(t_3) = \varepsilon(t_4)$,则由式(7)—式(10)可知

$$\psi = \arccos \frac{\omega_4 - \omega_2}{\omega_1 - \omega_3}$$

此方法可消除陀螺的零偏,快速地测得采煤机的航向角。在实际应用中,寻北仪的测量精度易受振动的影响,故将倾角传感器安装至机身振动相对较小的位置,并在下一阶段研究中设计减震装置。

4 结 论

1)建立了一种基于多感知方式组合测量的采煤机位姿检测系统,通过全站仪确定UWB固定基站群的位置坐标,通过UWB定位模型确定UWB定位节点相对于UWB固定基站群的位置坐标;通过倾角传感器和寻北仪对采煤机姿态角进行测量标定,从而实现采煤机的位姿检测。

2)完整推导了UWB定位系统基于TOA定位模型的CT算法,完整推导了全站仪坐标系与UWB固定基站群坐标系间的坐标变换矩阵,介绍了全站仪、寻北仪及倾角传感器的工作原理。分析了基于多感知方式组合测量的采煤机位姿检测系统在实际应用中的受限因素,并简要提出了改善方案。本系统在理论上可实现对采煤机综采工作面中的实时位姿检测,为系统仿真分析和实验平台搭建提供了理论参考。

3)基于多感知方式组合测量的采煤机位姿检测系统理论上实现了对采煤机在综采工作面中的实时位姿检测,为系统仿真分析和实验平台搭建提供了理论参考。

参考文献(References):

- [1] 葛世荣.智能化采煤装备的关键技术[J].煤炭科学技术,2014,42(9):7-11.
GE Shirong. Key technologies of intelligent coal mining equipment [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(9): 7-11.
- [2] 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,2017:27-89.
ZHANG Boyuan. Research on dynamic accurate position method of shearer [D]. Xu Zhou: China University of Mining and Technology, 2017: 27-89.
- [3] 方新秋,何杰,张斌,等.无人工作面采煤机自主定位系统[J].西安科技大学学报,2008,28(2):349-353.
FANG Xinqiu, HE Jie, ZHANG Bin, et al. Unmanned face coal mining machine autonomous positioning system [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2008, 28(2): 349-353.
- [4] 李振平.无人工作面采煤机自主定位系统[J].机械管理开发,2018,180(4):145-146.
LI Zhenping. Unmanned face coal mining machine autonomous position system [J]. Mechanical Management Development, 2018, 180(4): 145-146.
- [5] 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 Shangqing, WANG Shibo, XIE Guijun, et al. Research on positioning and positioning technology of shearer in longwall fully mechanized mining face [J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(6): 21-25.
- [6] 刘清.基于超宽带技术的采煤机定位系统设计[J].煤炭科学技术,2016,44(11):132-135.
LIU Qing. Design of shearer positioning system based on UWB technology [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(11): 132-135.
- [7] 贾文浩,陶云飞,符世琛,等.悬臂式掘进机位姿检测方法研究进展[J].煤炭科学技术,2016,44(1):96-101.
JIA Wenhao, TAO Yunfei, FU Shichen, et al. Research progress on attitude detection method of cantilever tunneling machine [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 96-101.
- [8] 吴迪,李仁发,梁华林,等.超宽带传感器网络室内信道建模与定位算法研究[J].系统仿真学报,2009,21(5):1352-1357.
WU Di, LI Renfa, LIANG Hualin, et al. Research on indoor channel modeling and location algorithm for UWB sensor networks [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(5): 1352-1357.
- [9] 贡东风,王震,伍永平,等.大倾角特厚煤层工作面圆弧段割煤工艺仿真研究[J].煤炭科学技术,2019,37(4):50-56.
YUN Dongfeng, WANG Zhen, WU Yongping, et al. Simulation research on cutting process of arc section in working face with large dip angle and extra thick coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2019, 37(4): 50-56.
- [10] 宋秋爽,袁智,宋振铎,等.综采成套装备试验平台关键技术研究[J].煤炭科学技术,2017,45(8):194-199.
SONG Qiushuang, YUAN Zhi, SONG Zhen duo, et al. Research on key technology of fully mechanized mining equipment test

- platform[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(8): 194-199.
- [11] 刘文谷. 全站仪测量技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 45-50.
- [12] 符世琛. 基于 UWB 测距的悬臂式掘进机姿态检测方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018: 39-60.
- FU Shichen. Research on position detection method of cantilever tunneling machine based on UWB ranging[D]. Bei Jing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2018: 39-60.
- [13] 杨 洲, 汪云甲, 陈国良, 等. 超宽带室内高精度定位技术研究[J]. 导航定位学报, 2014, 32(4): 31-35.
- YANG Zhou, WANG Yunjia, CHEN Guoliang, *et al.* Research on UWB indoor high precision positioning technology[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2014, 32(4): 31-35.
- [14] 符世琛, 李一鸣, 杨健健, 等. 基于超宽带技术的掘进机自主定位定向方法研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2603-2610.
- FU Shichen, LI Yiming, YANG Jianjian, *et al.* Research on autonomous positioning and orientation method of roadheader based on UWB technology[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2603-2610.
- [15] 符世琛, 李一鸣, 张敏骏, 等. 基于 UWB 信号的 TW-TOF 测距技术在狭长巷道中的精度测试实验研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(3): 246-249.
- FU Shichen, LI Yiming, ZHANG Minjun, *et al.* Experimental study on accuracy test of TW-TOF ranging technology based on UWB signal in narrow and long roadway[J]. Coal Technology, 2017, 36(3): 246-249.
- [16] 田 原. 悬臂式掘进机自动导向和定位技术探索[J]. 工矿自动化, 2010, 36(8): 26-29.
- TIAN Yuan. Exploration on automatic guidance and positioning technology of cantilever tunneling machine[J]. Industry and Mine Automation, 2010, 36(8): 26-29.
- [17] CAFFERY J. A new approach to the geometry of TOA location[J]. IEEE Trans. SP, 1994, 42(8): 1905-1915.
- [18] 李 莉, 邓 平, 刘 林. Taylor 级数展开法定位及其性能分析[J]. 西南交通大学学报, 2002, 37(6): 684-688.
- LI Li, DENG Ping, LIU Lin. Taylor series expansion method and its performance analysis[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2002, 37(6): 684-688.
- [19] FOY W H. Position-location solutions by taylor-series estimation[J]. IEEE Trans, 1996, 12(2): 187-194.
- [20] 谢芝玉, 刘雄飞, 胡志坤. 基于 Taylor 展开的 UWB 井下定位算法研究与实现[J]. 计算机工程与应用, 2017(5): 231-235.
- XIE Zhiyu, LIU Xiongfei, HU Zhikun. Research and implementation of UWB downhole positioning algorithm based on Taylor expansion[J]. Computer Engineering and Applications, 2017(5): 231-235.