

文章编号:1671-251X(2021)S2-0039-04

煤矿智能掘进机器人关键技术探讨

谢进, 王飞

(国家能源集团神东煤炭集团有限责任公司, 陕西 神木 719315)

摘要:从掘进机定位与定姿、机身状态感知、自动截割与远程人工干预、通信网络和人机交叉作业安全防护等方面探讨了煤矿智能掘进机机器人关键技术;通过搭载激光导引装置、光纤陀螺仪、光纤寻北仪、高精度加速度计的组惯性感导航系统实时监测掘进机位姿,修正掘进机截割航行方向;利用敏感元件和摄像机实时监测掘进机运行状态信息,提升掘进机感知能力;以远程人工干预操作平台和核心计算机完成掘进机远程人工控制和自动截割控制;采用 5G 通信技术实现掘进机信息的高带宽、低时延传输,保证掘进机与上位机互联;安装人员接近监测系统,避免人员与掘进机近距离交叉作业,提高现场人员安全防护能力。指出了高适应化、高智能化、高集群化是煤矿智能掘进机器人发展趋势。

关键词:掘进机器人;定位定姿;状态感知;自主截割;远程控制;信息传输;安全防护

中图分类号:TD632

文献标志码:A

Discussion on key technologies of intelligent tunneling robot in coal mine

XIE Jin, WANG Fei

(CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Shenmu 719315, China)

0 引言

随着煤矿行业装备向自动化、智能化方向不断纵深发展,井下综采工作面装备技术水平和回采效率得到显著提升,与此同时,掘进装备技术水平发展滞后,直接制约了煤矿巷道快速、精准的先期开拓,导致掘进效率低,影响煤矿高效生产,采掘失衡问题成为当前大型煤矿开采的主要难题之一。

煤矿掘进装备普遍采用驾驶员在驾驶室内通过手柄控制,人员作业环境恶劣,隐患较多。为达到“机械化换人、自动化减人”的目标,煤矿掘进装备需要完成机器人化,从而实现掘进工作面少人化、无人化。

煤矿智能掘进机器人是指能够通过自动控制自主完成煤矿掘进任务的工业特种机器人,具备感知、决策和执行 3 种要素,且装备有齐全的定位、姿态和超前探测传感器,可根据预定任务选择最优的参数规划和决策,在任务执行过程中根据现场变化情况做出相应调整。本文从机身定位与定姿、机身状态感知、自动截割控制与远程人工干预、通信网络和人机交叉作业安全防护等方面介绍了煤矿智能掘进机器人关键技术,并展望了煤矿智能掘进机器人发展

趋势。

1 煤矿智能掘进机器人关键技术

煤矿智能掘进机器人具备精准导航系统和位姿监测系统,可根据自身位置及姿态变化自主调整和纠偏,适应巷道断面及底板起伏等地质条件,实现自主定位导航。在此基础上,掘进机器人可进行自适应截割、自动截割与远程遥控操作截割,能够实现自主记忆截割功能。

1.1 机身定位与定姿

由于煤矿井下设备无法直接与卫星通信,所以无法实现精准遥感导航。惯性导航系统具有以下优点:① 不依赖外部信息,不向外部辐射能量,隐蔽性和抗干扰性能优。② 可以全时工作于任何空间。③ 测算的位置、速度、航向角和姿态角数据连续性好且噪声低。④ 数据更新率高、短期精度高且稳定性好。在掘进工作面使用惯性导航系统具有更强的适应性。

惯性导航系统属于一种推算导航方式,通过安装在设备上的三轴陀螺仪和 3 个方向的加速度计,测量出设备在三维空间的姿态角(或角速率)及加速度,从初始位置根据连续测得的设备航向角和速度

收稿日期:2021-02-02;责任编辑:盛男。

作者简介:谢进(1980—)男,重庆人,工程师,现从事矿井机电管理方面的工作,E-mail:1399124650@qq.com。

推算出其下一点位置,从而测算出设备当前位置。惯性导航系统是由设备自身搭载陀螺仪和加速度计 2 种惯性敏感元件,由陀螺仪形成一个导航坐标系,加速度计的测量轴映射在该坐标系中,从而测得航向角和姿态角,由加速度计经过对时间的一次积分测算出速度,速度再经过对时间的一次积分即可得到设备运行距离。

为保证惯性导航系统精度,掘进机器人应搭载光纤陀螺仪、光纤寻北仪、高精度加速度计等惯性测量单元。光纤陀螺仪具有工作带宽大、分辨率高、零点漂移小、线性度高、启动时间短、抗冲击性好、抗振动能力强等特点。光纤寻北仪可以最大程度消除温度变化产生的影响,极低的零偏稳定性和强大的抗振能力更加适应掘进机器人的作业环境。高精度加速度计是惯性导航系统精确制导的前提,减少 3 个惯导轴向加速度的累计误差。独立的惯性导航系统随着时间推移,累计误差会逐渐增大,为消除惯导坐标系偏移导致的累计误差,采用激光导引技术与惯导系统组合(图 1),为惯导修正测量值。为保证煤矿井下掘进机器人导航精度,光纤陀螺仪量程高于 $\pm 300\text{ }(^{\circ})/\text{s}$,方向角与姿态角保持精度小于 $0.02\text{ }(^{\circ})/\text{h}$;寻北时间小于 5 min ;加速度计量程高于 $\pm 20\text{ g}$ (g 为重力加速度),零偏稳定性小于 $50\text{ }\mu\text{g}$ 。

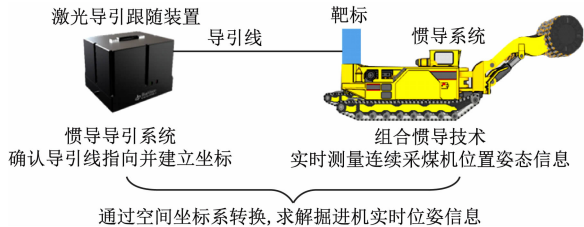


图 1 组合惯导系统

1.2 机身状态感知

掘进机状态信息包含 3 个部分:① 机身航向角、横滚角、俯仰角等姿态信息;② 掘进机的装运电动机、泵电动机、通风机电动机、截割电动机、牵引电动机等运行状态信息;③ 截割高度、刮板输送机中部槽方向、铲板高度、稳定靴位置等动作信息。以上信息均可由传感器采集完成,并将数据上传至核心计算机和远程集控中心。

掘进机器人的视频监控采用矿用本安型云台红外热成像技术和黑光低照度成像技术相结合的摄像机,分辨率大于 400 万像素,摄像仪集成视频采集、音频采集、角度调整、距离调整、红外补光等功能,实现对掘进机重点部位的全角度音视频监控。

掘进机器人负载的多种感知元件(图 2)可代替司机的视觉、听觉、触觉,使设备具有状态记录、远程

控制、视频监控、故障预判等功能,实现对机器人的视频监控、远程控制、自动截割、人工干预。



图 2 掘进机器人感知元件分布

1.3 自动截割控制与远程人工干预

1.3.1 自动截割控制

根据煤矿巷道掘进工艺,掘进机器人按照自身核心计算机的智能化程度,其自动截割分为记忆截割、预测截割、自主截割 3 种方式,从而满足掘进工程生产需求。

记忆截割是掘进机器人通过学习采煤机司机示范刀轨迹自动生成标准截割工艺,自主按照示范刀进行截割,无法自动修改割煤轨迹,割煤参数由人工干预完成。

预测截割是掘进机器人通过分析历史截割数据,计算识别煤层变化规律,预测下一刀截割轨迹;一次预测割煤参数后进行截割,经自主学习后再次预测割煤参数后进行截割,循环往复。按照生产工艺要求,预测截割断面成形边界控制精度小于 10 cm 。

自主截割是掘进机器人通过对比工作面精确三维地质模型和实测模型,在综合分析煤层变化趋势、当前顶底板情况、掘进机运行状态等大数据基础上,通过优化算法制定未来多个掘进循环的截割策略,给出掘进机下一刀截割臂调整曲线,指导掘进机截割。自主截割断面成形边界控制精度小于 5 cm 。

1.3.2 远程人工干预

掘进机器人远程人工干预操作平台包含遥控器总成和监控系统。遥控器总成具有远距离控制、信号显示、设备急停、信号中断保护等功能;遥控响应时间小于 100 ms 。掘进机器人远程控制具有远程参数整定、程序修改、远程操作等控制功能。监控系统可实时监控掘进机器人运行状态信息、位姿导航信息、机身动作信息及现场视频画面信息。

1.4 通信网络

掘进机器人远程监控需要传输大量视频、语音、控制命令、设备和环境状态信息等数据。根据掘进机器人移动运行特性,采用无线通信网络更为适宜。为满足掘进机器人远程控制需求,矿井工业网络应

具备大带宽、低时延、抗干扰等特征。目前煤矿工业环网的最大带宽能达 1 万兆,二级交换采用工业以太网交换机设备,二层交换及组网模式不能完全达到毫秒级的末端通信,是制约掘进机器人发展的瓶颈。

5G 通信技术拥有极高的传输速率,约为 10 Gbit/s,是 4G 通信网络的数百倍以上。5G 通信网络时延约为毫秒级以下,而 4G 通信网络时延约为 50 ms,提高约 50 倍。5G 通信网络的吞吐量约为 4G 网络的 100 倍。5G 通信网络理想情况下端到端时延为 1 ms,典型端到端时延为 5~10 ms,而 4G 通信网络端到端理想时延为 10 ms 左右,LTE 的端到端典型时延为 50~100 ms。掘进机器人控制延迟要求在毫秒级,可靠性需要达到 99.99%,5G 技术更能满足控制使用需求。由于井下多为狭长型通道,经常出现弯道与坡度,所以掘进机器人的 5G 通信基站采用室内分布天馈系统(耦合器、功分器、定向天线),根据巷道走势、天馈系统覆盖能力灵活布置相应的基站,从而避免信号大幅衰减。

1.5 人机交叉作业安全防护

煤矿井下掘进机器人运行在提高生产效率的同时,给设备周围采煤机司机、运煤车司机、锚杆机司机、支护工、检修工等作业人员带来潜在安全风险。为确保掘进机器人与其他人员交叉作业的安全性,在掘进机器人上安装人员接近监测系统,用于探测一定范围内存在的作业人员。人员接近监测系统对掘进机器人本体及周围区域进行危险程度评价,根据不同的危险系数划分为操作区域、警告区域、停机区域等,当预先设定的区域内有人员进入时,系统自动发出预警信号,或使移动设备停止运行,从而防止设备伤害作业人员。

人员接近监测系统主要由机载设备和人员随身携带的本安信息化矿灯两部分构成,机载设备和本安信息化矿灯通过电磁波实现通信和定位功能。机载设备为直流电供电,主要由主控器、探测器等组成,机载各设备之间通过矿用通信电缆进行连接,实现信号传输。主控器连接掘进机器人电控箱实现系统取电和停机控制等功能。人员接近监测系统的机载设备与本安信息化矿灯的标志卡相互发射电磁波,根据电磁波传播时间和光速的乘积计算出两者之间的精确距离,通过系统主控计算机以一定算法计算多个探测器监测到的人员距离,可确定本安信息化矿灯相对于掘进机器人的唯一坐标位置,系统根据坐标识别人员所在区域。当人员进入警告区域时自动发出预警信号,提醒人员注意安全。人员进入停机区域时控制掘进机器人停止运行,防止伤害

作业人员。人员接近监测系统工作原理如图 3 所示。

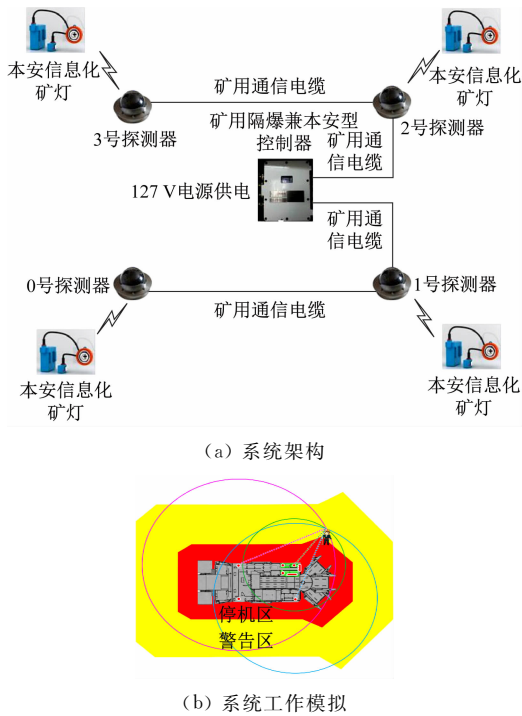


图 3 人员接近监测系统工作原理

启机检测:在掘进机器人通电后,人员接近监测系统立即开始工作,当检测到停机区域存在人员时,不允许设备执行启机动作,从而避免设备启动时出现伤人事故。

自动停机:当运行过程中系统检测到停机区域存在人员时,立即将掘进机器人停机,从而避免设备运行过程中的伤人事故。

双向报警:当系统检测到警告区域存在人员时,设备和人员随身携带的本安信息化矿灯发出声光报警信号,提醒人员注意安全。

2 煤矿智能掘进机器人发展趋势

煤矿掘进要实现无人化生产,必须融合云计算、大数据、5G 传输和人工智能等先进技术,赋予掘进装备自主感知和自主控制能力。煤矿智能掘进机器人的发展将向高适应化、高智能化、高集群化 3 个方面延伸。

(1) 高适应化。不同井田的煤层地质赋存条件差异较大,在同一矿井开拓不同功能巷道所需的生产工艺也有差别,未来煤矿会将适应不同生产条件的掘进机器人功能属性做为研发重点,即特型机器人。

(2) 高智能化。掘进机器人从人工远程干预向自主截割方向逐步发展,最终实现机器人依靠自我意识完成复杂、高质量的掘进生产任务。

(3) 高集群化。煤矿巷道掘进是多种装备协同

运行的结果,钻探机器人、掘进机器人、支护机器人、运煤机器人等多种智能掘进装备群组化快速协同作业,最终实现探、掘、支、运的无人化生产。

3 结语

煤矿巷道掘进作业人员数量多,工作环境恶劣,劳动强度大,装备智能化程度低,严重制约了煤矿智能化转型和安全高效绿色发展。智能掘进机器人的研制投用可实现对掘进装备的远程控制,减少工作面人数,降低人员劳动强度,免受粉尘、噪声等侵害,远离矿井灾害威胁,确保人员安全,打破煤矿掘进传统作业方式,是实现煤矿少人、无人化生产的关键核心,为煤矿智能化建设奠定了基础。

参考文献:

[1] 杨健健,张强,王超,等. 煤矿掘进机的机器人化研究现状与发展[J]. 煤炭学报,2020,45(8):2995-3005.

[2] 刘送永,张德义. 巷道掘进机智能化技术研究现状及展望[J]. 工矿自动化,2019,45(10):23-28.

[3] 张旭辉,陈利,马宏伟,等. 煤矿掘进机器人虚拟仿真与远程控制系统[J]. 工矿自动化,2016,42(12):78-83.

[4] 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.

[5] 田原. 基于四点式光靶的掘进机自动定位方法研究[J]. 煤炭科学技术,2018,46(12):35-40.

[6] 张旭辉,刘博兴,张超,等. 掘进机全站仪与捷联惯导组合定位方法[J]. 工矿自动化,2020,46(9):1-7.

[7] 李森. 基于惯性导航的工作面直线度测控与定位技术[J]. 煤炭科学技术,2019,47(8):169-174.

[8] 田原. 基于零速修正的掘进机惯性导航定位方法[J]. 工矿自动化,2019,45(8):70-73.

[9] 杨健健,张强,吴森,等. 巷道智能化掘进的自主感知及调控技术研究进展[J]. 煤炭学报,2020,45(6):2045-2055.

[10] 张超,张旭辉,张楷鑫,等. 数字孪生驱动掘进机远程自动截割控制技术[J]. 工矿自动化,2020,46(9):15-20.

[11] 王国法,杜毅博. 煤矿智能化标准体系框架与建设思路[J]. 煤炭科学技术,2020,48(1):1-9.

[12] 王杜娟,贺飞,王勇,等. 煤矿岩巷全断面掘进机(TBM)及智能化关键技术[J]. 煤炭学报,2020,45(6):2031-2044.

[13] 王国法,赵国瑞,胡亚辉. 5G 技术在煤矿智能化中的应用展望[J]. 煤炭学报,2020,45(1):16-23.