

金属矿山硬质地层智能化掘进发展现状及展望

陈新明^{1,2}, 孙金宇^{1,2}, 焦华喆^{1,2}, 王琪^{1,2}

(1. 河南理工大学地下工程与灾害防治重点实验室; 2. 河南理工大学土木工程学院)

摘要:当前金属矿山硬质地层掘进技术向智能化方向发展,其重点在于组合定位技术和轨迹跟踪控制技术。详细介绍了各阶段金属矿山硬质地层掘进技术和导航定位技术发展成果,并在探究其发展规律的同时深入剖析了技术层面的不足。对组合定位、轨迹跟踪现有成果进行了全面论述与客观点评,并针对新型矿山智能掘进设备设计了一套组合定位方案。最后对金属矿山硬质地层智能化掘进未来发展方向与研究重点进行了展望。

关键词:金属矿山;硬质地层;掘进技术;掘进设备;组合定位;轨迹跟踪;智能掘进

中图分类号:TD853

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)02-0001-12

doi:10.11792/hj20250201

引言

在当代工程建设的进程中,金属矿山硬质地层掘进已然成为一道无法回避的难题。随着科技的迅猛发展,工程技术领域全面迈向智能化转型的时代潮流,在此背景下,金属矿山硬质地层掘进技术亦应与时俱进,积极投身于智能化的研究探索之中,以契合时代发展的迫切需求。

当今社会,对矿产资源的需求呈现出持续且快速增长的态势,地表资源已难以支撑工业发展的庞大需求,这使得采矿工程不可避免地逐步向深部拓展。然而,硬质地层复杂多变的地质条件及严苛的开采难度,给工程作业带来了诸多的棘手难题。其中,智能化开采的迫切需求与相对滞后的机械技术之间的矛盾日益凸显,成为制约行业发展的关键因素之一。

过去的数十年间,众多研究者针对金属矿山硬质地层的智能化开采付出了不懈努力,开展了大量的深入研究工作。但就目前的实际情况而言,在诸如精准制导、无人化开采等关键方面,尚未能完全达到预期的要求和标准。例如:部分现有技术在信号输出的稳定性方面表现欠佳,难以保证持续稳定的信号传输;定位精度的持续性不足,随着作业时间的推移或环境的微小变化,定位精度会出现明显的波动;而且在面对复杂多变的工程环境时,其适应性也存在较大的提升空间,难以灵活应对各种突发状况和复杂工况。

本文全方位、系统性地梳理了金属矿山硬质地层智能化掘进的发展历程及现阶段所取得的各项成果,深入探讨了各种研究成果的优势与不足之处,以及各

自的适用场景和范围。期望为未来的研究工作提供清晰、明确的思路与方向指引,有力推动金属矿山硬质地层智能化掘进技术的持续发展,进而显著提升深部地下矿产开采的工作效率,并为作业人员提供更为可靠的安全保障。

本文将金属矿山硬质地层掘进技术与导航技术紧密结合,详尽地阐述各阶段掘进技术与导航技术所取得的发展成果,深入剖析各技术阶段存在的问题与不足之处;继而对组合定位、轨迹跟踪这2个智能化发展重点方向上的现有成果展开全面、深入论述与客观公正点评,进一步深入探讨金属矿山硬质地层智能化掘进技术的未来发展方向;最后,对未来相关研究的潜在方向进行合理展望,提出具有可行性的研究方向及需要重点关注和攻克的关键问题,为该领域的进一步发展贡献一份力量。

1 硬质地层特征

硬质地层是一种具有较高硬度和强度的地层类型,主要特征体现在岩石成分与结构、物理力学特性及工程地质特征等3个方面。

1.1 岩石成分与结构

从岩石成分的视角深入剖析,硬质地层大多是由具备较高硬度特质的岩石所构成,此类岩石普遍富含丰富的石英与长石^[1]。花岗岩堪称硬质地层中极具代表性的典范之一,其内部主要由石英、长石及云母这几种矿物组合而成^[2]。而石英砂岩亦属于硬质地层里较为常见的一种类型,在其岩石组成结构中,石英颗粒占比高达90%,甚至更多。这些石英颗粒之

收稿日期:2024-12-20; 修回日期:2025-01-10

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52374121);国家重点研发计划项目(2023YFC2907203)

作者简介:陈新明(1970—),男,教授,博士,从事矿山隧道、注浆方向的研究工作;E-mail:chenxinming@163.com

间相互紧密胶结,正是这种特殊的胶结结构,赋予了岩石卓越的硬度性能及强大的抗压强度,从而使其在整体上展现出硬质地层的显著特征,能够承受较大的外力压迫而不易发生变形与损坏,在众多工程地质及地质构造研究等领域都具有极为重要的地位与研究价值。

从岩石结构维度展开分析,硬质地层的岩石呈现出极为致密的结构特性。其中,主要的代表岩石类型包含花岗岩、玄武岩及片麻岩。花岗岩作为典型的深成侵入岩,具备独特的中粗粒结构。在这种结构里,其矿物颗粒之间相互紧密镶嵌,形成了稳固的结构体系。正是由于这样的结构特质,花岗岩拥有较高的抗压强度,一般为100~250 MPa,这使其能够有力地承载来自上部岩层的巨大压力,在众多地质构造及工程建设场景中展现出卓越的承载能力。

玄武岩属于喷出岩类别,在其形成过程中,由于经历了快速冷却阶段,矿物晶体未能有充足的时间充分生长发育,进而形成了细粒至隐晶质结构。这种特殊结构致使岩石内部的矿物颗粒呈现出紧密排列的态势,其孔隙率处于较低水平,通常为1%~10%。如此紧密的结构排列赋予了玄武岩较高的硬度指标及出色的抗渗透性,使其在抵抗外界侵蚀及承受一定压力方面表现突出。

片麻岩作为变质岩的一种,具有显著的片麻状构造。在形成过程中,其矿物颗粒在定向压力的持续作用下,呈现出平行排列的典型特征。并且经过变质作用的改造,矿物颗粒之间的结合更为紧密牢固。这种独特的结构使得片麻岩具备较高的强度性能,能够承受较大的压力作用而不易发生变形,在地质稳定性及相关工程应用中有着不可忽视的重要意义。

1.2 物理力学特性

硬质地层的物理力学特性在硬度、强度与孔隙率这3个关键方面有着鲜明的体现。

从硬度这一关键角度深入剖析,硬质地层具有显著的高硬度特征,其莫氏硬度一般能够达到5级以上。这种高硬度特性使得硬质地层在遭受外部作用力时,展现出极强的抗磨损与抗刻划能力。当普通挖掘工具与硬质地层相接触时,由于硬质地层硬度远超普通工具材质的硬度,普通工具难以在其表面留下明显的痕迹或造成有效的挖掘效果,在挖掘过程中,工具极易出现磨损、变形甚至损坏等情况。这也充分表明,普通的挖掘工具无法完全契合硬质地层的开挖需求与条件。为了能够顺利开展针对硬质地层的挖掘作业并实现有效的挖掘效果,必须采用特殊的硬质合金刀具或者钻头。这些特殊的工具凭借其更为坚硬的材质及特殊的制造工艺,具备了足以应对硬质地层

高硬度挑战的能力,能够在硬质地层上进行有效的切削、破碎等挖掘操作,从而为硬质地层的开发利用提供保障。

硬度较高的地层,其强度通常也颇为可观,所以强度高是硬质地层极为典型的特征。硬质地层的抗压强度一般为100 MPa左右,而某些优质的花岗岩,其抗压强度更是高达300 MPa。这种高强度特性使得硬质地层在地下建筑工程领域具备了极为重要的价值,能够充当极为出色的承载基础。以矿山工程为例,硬质地层的优势主要体现在以下几个方面:工程建设方面,硬质地层能够承受大型采矿设备、运输设备等的巨大重量和运行时产生的振动及冲击力,确保设备在运行过程中的稳定性和安全性,减少设备因地基不稳而出现的故障和损坏,提高设备的使用寿命和生产效率;开采建设方面,在地下矿山开采中,硬质地层自身的高强度和稳定性可以在一定程度上减少对巷道支护的需求;资源利用方面,硬质地层在开采过程中不易破碎和混入废石,使得矿石贫化率较低,从而可以提高矿石回收率。

硬度与强度二者均和岩石的致密度存在紧密的关联,低孔隙率及低渗透率亦属于硬质地层所具有的典型物理性质。由于硬质地层中的矿物颗粒呈现出紧密堆积的状态,致使其孔隙率一般为1%~10%。这种较低的孔隙率会产生诸多重要影响。一方面,它显著降低了流体在地层中的渗透速度,因为可供流体流动的孔隙空间极为有限。另一方面,低孔隙率使得硬质地层成为了极为理想的隔水层或弱渗水层。当地下水试图在地层中运动时,其流动路径会受到极大限制,地层就像一道坚固的屏障,有效地阻碍了地下水的顺畅运动。对于维持地层上方及周边区域的水文地质环境稳定起到了关键作用,有效降低了矿坑涌水、突水等水害事故的发生概率,减少了对人员和设备的威胁,在保障矿山生产安全、提高了矿物开采效率的同时,也极大地延长了矿山服务年限。

1.3 工程地质特征

硬质地层的岩石成分与结构及物理力学特性等自然性质,深刻地影响着工程的开展,尤其是在稳定性和开挖难度这2个关键方面。

从稳定性这一关键要素考量,硬质地层对工程安全所起到的积极作用极为显著。其自身所具备的超高硬度与强度,使其在自然状态下就拥有超乎寻常的稳定性。这种稳定性为地下工程的施工深度拓展创造了有利条件,使得工程能够向更深处挖掘推进,而不必过度担忧地层承载能力不足引发的安全隐患。当遭遇地震、滑坡及风化等自然灾害时,硬质地层起到了骨架的作用,承担山体的绝大部分重量。硬质地

层凭借其自身强大的力学性能,有效抵御自然力量的冲击与侵蚀,维持山体结构的相对稳定。只要硬质地层未出现大规模的破坏情况,那么依托其构建的工程整体结构便能够保持稳固,极大地降低了因自然因素导致的工程结构失稳、损坏等风险,为各类工程在复杂地质环境中的长期安全运行提供了极为可靠的保障基础。无论是在矿山开采工程中对巷道稳定性的维护,还是在交通隧道、水利水电地下厂房等工程建设中保障结构安全方面,硬质地层的稳定特性都具有不可替代的重要意义。

从可钻性的视角出发,硬质地层相较于软岩地层,在钻进过程中面临着诸多挑战。其钻进速度显著降低,这主要归因于硬质地层的高强度与高硬度特性。由于地层坚硬,钻头在切削或破碎岩石时需要克服更大的阻力,因此需要更大的扭矩和钻压来推动钻头前进。例如:在地质勘探作业中,一旦钻头触及硬质地层,就必须加大动力输出,否则难以实现有效钻进。然而,这种高要求的钻进条件也导致钻头的磨损速度急剧加快。在强大的作用力与硬质地层的摩擦作用下,钻头的切削刃、表面涂层等部分极易发生磨损、变形甚至破损。这就对钻探工作提出了更高的技术要求,即需要在钻探过程中密切依据实际工况,及时且灵活地调整钻头类型与钻进参数。通过选用适配硬质地层的硬质合金钻头、金刚石钻头等特殊钻头,并精确优化钻压、转速、给进量等参数,从而在尽可能提高钻进速度的同时,最大程度地降低钻头的过度磨损,保障钻探作业的高效、经济与安全,减少因钻头频繁更换与钻进效率低所带来的成本增加与工期延误等问题。

2 金属矿山硬质地层掘进技术发展

金属矿山硬质地层掘进技术的发展历程与人类科技的进步紧密相连,相互促进、协同发展。从科技的演进阶段来看,可以将金属矿山硬质地层掘进技术大致划分为传统掘进技术和现代掘进技术2个阶段。

2.1 传统掘进技术

在应对金属矿山硬质地层掘进这一棘手难题的过程中,早期由于受到工程材料及信息传递等多种技术条件的束缚,可利用的有效手段十分有限。在这样的背景下,火药的应用成为了突破硬质地层限制的关键途径,因此钻爆法属于针对硬质地层最传统的掘进方法^[3-4]。

钻爆法原理是依靠钻孔、装药、爆破来破碎硬质岩石。在早期矿山开采过程中,矿工使用简易手持风钻在岩石上钻孔,然后填埋炸药爆破岩石。这种钻孔方式精度低、效率低、劳动强度大,随着技术发展出现

了更高效的凿岩机器,如液压凿岩机。液压凿岩机能够快速、准确地钻孔,相比手持风钻钻孔效率大大提高。

钻爆法需要对钻孔位置进行精准计算,才能达到预定的爆破效果。早期对钻孔进行定位主要依靠简单的测量工具和工人经验。例如:用罗盘测定钻孔方位角,用皮尺测量钻孔间距等。这种方法不仅效率低,而且精度难以保证。到了20世纪70年代,电子测距技术与经纬仪相结合,得到了最初的全站仪。全站仪投入到钻孔定位工作中,大大提高了定位精度和效率,直到现在依旧在很多工程中广泛应用。

在地面以上的开阔地区使用钻爆法时,全站仪定位由于需要人工操作,因此在自主性方面稍显逊色。与全站仪一同发展的GPS(Global Positioning System, GPS)则是一种完全自主的定位技术,弥补了全站仪的不足。GPS于1973年开始研发,最终在1995年实现了完全运行。GPS利用多个卫星与目标距离来确认目标方位(如图1所示),该定位原理使得GPS定位精度高于其他导航系统,但是由于信号多路径反射使得GPS定位精度达不到理论高度(如图2所示)。

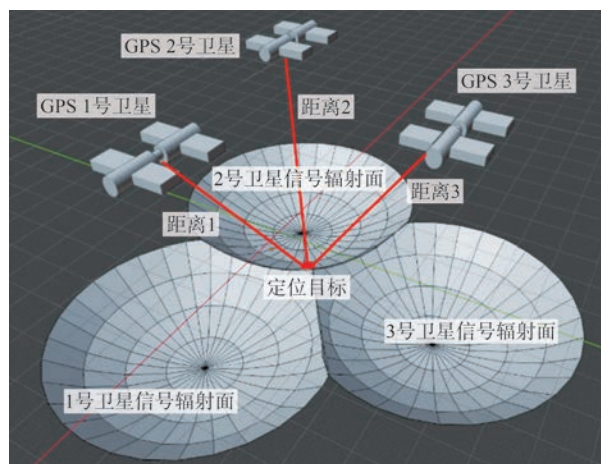


图1 GPS定位原理

Fig. 1 Mechanism of GPS positioning

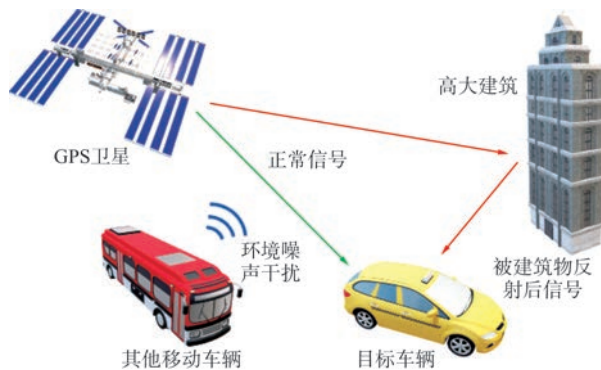


图2 GPS多路径反射图

Fig. 2 GPS multipath reflection

虽然钻孔技术得到了一定程度的发展,但并不能

摆脱钻爆法的局限性。首先,爆破会产生振动,可能会降低工程周围岩体稳定性进而诱发滑坡、地震等地质灾害。若是在重要建筑物附近,则需要严格控制振动的影响范围。其次,爆破产生的岩体碎块大小不均匀,需要进行二次破碎和清理,大大增加了施工的时间和人力成本。最后,爆破的安全性也是一个重大问题,炸药的运输、储存、使用等各个阶段都存在一定的安全隐患,需要耗费非常大的管理成本^[5-6]。因此,学术界开始了对机械破岩的研究,这也使得金属矿山硬质地层掘进技术发展到了现代掘进技术阶段。

2.2 现代掘进技术

在对金属矿山硬质地层掘进技术的探索中出现了一些简单的机械掘进设备,如硬岩掘进机。这些设备利用刀具对岩石进行切削,大大降低了施工对围岩及周围建筑的干扰^[7-9]。但是由于受到材料和动力系统限制,早期机械破岩设备掘进效率偏低,刀具磨损、设备故障频发,导致只能在较浅的硬质地层或硬度稍低的地层中使用。由于GPS对卫星信号质量要求极高,地下环境中信号质量不稳定,因此GPS无法应用于地下定位。与之相反的视觉定位、惯性导航及超宽带定位等技术由于能够适应地下定位环境,而逐渐占据了主导地位。

随着机械破岩技术的发展,硬岩掘进机(TBM)逐渐成为了针对硬质地层的掘进利器。TBM刀盘上安装多个滚刀,滚刀在推力作用下与岩石接触,当刀盘旋转时滚刀在旋转惯性作用下对岩石施加压力,最终实现岩石的破碎化处理。TBM机身结构非常复杂,包括刀盘、护盾、控制系统、出渣系统等多个部分,先进的破岩原理和强大的掘进能力使得TBM成为了现代掘进机械的经典代表。

与此同时,TBM也对定位系统提出了更高的要求。由于TBM采用全断面一次性开挖,如果出现偏差后期很难修改,因此对定位精度的要求更高;随着掘进距离的增加,任何微小的姿态偏差都有可能导致工程严重偏离设定路线,因此TBM对机身姿态的把控也极其严格;TBM工作环境极其恶劣,在地下巷道要面临高湿度、高粉尘、强振动等情况,因此要求定位系统对环境有较强的适应性。严苛的工程条件使得任何一种定位系统都难以完成TBM定位技术,于是多传感器融合定位技术,即组合定位技术,开始逐步兴起。

3 组合定位研究现状

众多工程机械往往非常重视机体姿态信息,由于惯性导航技术能够获取关于机体非常全面的速度、位置及姿态信息,因此成为组合定位技术的核心。但

是,惯性导航在经过长时间定位工作后会出现数据发散现象,导致定位精度下降。因此,惯性导航往往需要与能够保持长时间定位精度的定位技术相结合,从而抑制数据发散。目前,常用的组合定位方案有全球卫星导航/惯性导航系统、视觉导航/惯性导航系统及超宽带导航/惯性导航系统。本节主要从定位精度和算法优化2个方面对以上3种组合定位技术研究现状进行论述。

3.1 全球卫星导航/惯性导航系统组合定位技术

由于全球卫星导航系统和惯性导航系统在性能上互补,所以全球卫星导航/惯性导航系统组合定位是目前世界上公认的最佳方案^[10]。该组合定位方案已被广泛应用于包括无人驾驶汽车、无人机导航在内的各行各业。

3.1.1 组合定位方案可行性分析

惯性导航系统是一种完全自主的导航系统,短期测量精度较高,可同时提供位置、速度、姿态信息,但由于存在误差积累使得长期导航出现精度下降现象。

全球卫星导航系统利用信号发射与接收时间差计算得出用户与卫星之间的距离,确定与多个卫星距离后可计算出自身准确位置。全球卫星导航系统能在地球上任何地点为用户提供全天候三维坐标、速度及时间等信息,但是GPS容易受到环境影响,导致信号失锁,影响导航定位^[11]。

对比惯性导航系统与全球卫星导航系统特点,发现二者有较好的互补性,将二者组合起来可以得到更加稳定、精度更高的组合定位方案,具体评价结果如表1所示。

表1 全球卫星导航系统与惯性导航系统性能特点对比

Table 1 Comparison of performance characteristics between global satellite navigation system and inertial navigation system

性能特点	全球卫星导航系统	惯性导航系统	组合定位系统
自主性	自主	完全自主	完全自主
导航信息	不全	全	全
误差特性	不随时间积累	随时间积累	不随时间积累
实时性	好	好	好
更新率	高	高	高
抗电磁能力	弱	强	强
环境适应性	一般	强	强

3.1.2 研究现状

3.1.2.1 定位精度

传统卫星导航无法满足高动态、高精度定位要求,尤其在加速度大于10g的情况下经常出现信号丢失现象。陈刚等^[12]针对全球卫星导航系统在高动态条件下高精度定位需求,采用惯性辅助接收机和码片窄结合的方式,在减小跟踪环路带宽的同时降低伪距

抖动误差,仿真结果表明,该研究将定位精度从6 m提高到3 m,效果显著。此次研究提出利用环路带宽来反映各种滤波器滤波效果的方法为以后衡量滤波器工作效果提供了一种有效的检测方法。

无人驾驶和智能交通对载体定位精度和载体间协同控制能力要求非常高。当前思路是依靠增加传感器获得更多定位数据,从而提高载体定位精度。该思路原理简单,但不符合时代对组合定位技术发展要求,盲目增加传感器数量会加大计算负荷、降低计算速度,且无法有效解决因环境因素导致卫星信号不稳定的问题。针对以上问题,李博峰等^[13]提出了全球卫星导航/惯性导航系统组合载体协同高精度定位方法,通过创建如图3所示的载体间相对位置关系,实现载体间观测值共享,从而提高载体定位精度。针对该研究进行了双车协同定位试验,试验结果表明:全球卫星导航/惯性导航系统组合载体协同高精度定位方法在恶劣环境下定位精度比单一导航定位系统更高,同时改善了测速精度和定姿精度。该研究在建模、原理介绍方面都十分优秀,但是在最后仿真阶段只设计了2辆小车,与多载体协同定位的设计理念不匹配。

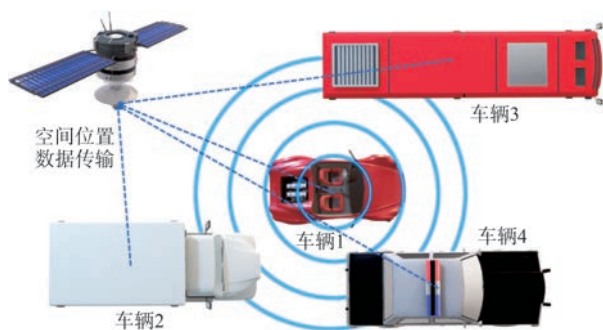


图3 车辆雷达衍射图

Fig. 3 Diffraction of vehicle-borne radar

3.1.2.2 算法优化

欺骗干扰是全球卫星导航系统面临的一项重大威胁,现有研究只能针对欺骗信号进行检测而不能恢复正确导航结果。商向永等^[14]利用 Multi-correlator 结构进行参数估计,实现欺骗信号辨识,将辨识结果进行反馈抵消欺骗信号,同时引入抗差卡尔曼滤波算法减小参数估计和信号辨识对定位精度的影响。测量结果表明,在欺骗干扰情况下利用优化算法可以将定位精度从600 m提高到10 m。该研究图像丰富、理论讲解详细,图像与理论讲解也能很好地对应。

当全球卫星导航系统受到电磁干扰或者人为干扰时,输出会受影响。林雪原等^[15]针对该问题构建了全球卫星导航/惯性导航系统组合定位滤波模型,论述了变分贝叶斯原理,将变分贝叶斯理论与抗野值自

适应滤波理论结合,提出了一种改进全球卫星导航/惯性导航系统组合定位抗野值自适应滤波算法。试验表明,该算法在全球卫星导航系统输出误差发生变化时能准确估计误差,在全球卫星导航系统输出发生故障时对系统进行抗野值自适应信息处理,进而提高系统滤波精度。

基于上述研究内容,可归纳得出如下结论:

1)在高动态环境下,现有常规导航系统往往难以满足高精度导航的要求。而陈刚等^[12]所提出的创新性方法有效攻克了这一难题,为高动态条件下导航系统的后续研发工作开创了崭新的思维路径,有望助力高精度导航在高动态场景中的应用取得进一步突破。例如:应用于高速飞行的航空器、高机动性的军事作战装备等领域,从而提升复杂动态环境下的导航精度与可靠性。

2)随着人类社会朝着高度智能化的方向稳步迈进,自动驾驶技术与智能交通体系已成为未来发展进程中不可或缺的关键构成部分。李博峰等^[13]提出的全球卫星导航/惯性导航系统组合载体协同高精度定位方法,精准契合了智能驾驶对于高精度定位的严苛需求,为智能驾驶车辆提供了一种切实可靠且行之有效的定位手段。这不仅有助于提升自动驾驶车辆在行驶过程中的定位精度,增强行驶安全性,还将对整个矿业智能交通运输的蓬勃发展起到积极的促进作用,推动其朝着更加高效、安全、智能的方向前行。

3)卫星导航系统在实际应用中面临着欺骗干扰这一严峻挑战,长期以来该问题一直未得到妥善有效的解决,严重威胁着依赖卫星导航的众多领域,如航空航天、航海运输及陆地交通等行业的导航准确性与安全性。在此背景下,商向永等^[14]的研究成果具有重要的实践价值,且提出的方案具有简单易行的显著优势,同时能够显著提升应对欺骗干扰的效果,无疑在该研究领域实现了重大突破,为卫星导航系统在复杂电磁环境下稳定可靠运行提供了有力保障,有望在实际应用场景中广泛推广,提升卫星导航系统的抗干扰能力与整体性能。

4)尽管组合定位技术相较于传统单一导航模式具有显著优势,但在实际应用中仍然难以完全规避各类干扰因素的影响。这些干扰因素的存在可能导致定位精度下降,进而影响导航系统的可靠性与稳定性,限制其在对定位精度要求极高的工程领域中的应用。林雪原等^[15]提出的新型滤波算法为解决这一问题提供了有效途径,通过提高系统对数据的处理精度,能够显著增强组合定位系统在复杂干扰环境下的性能。这一创新性算法极有可能引领未来组合定位技术的发展方向,成为该领域后续研究的重要热点之

一,推动组合定位技术不断优化升级,以更好地满足海、陆、空等不同领域日益增长的高精度、高可靠性导航需求。

综上所述,鉴于组合定位技术在解决各类复杂工程难题方面展现出的独特优势,以及其在提升导航精度、可靠性和稳定性等方面的突出表现,未来矿业工程的导航系统发展应以组合定位技术作为核心方向。通过组合定位实现毫米级精准定位,进而推动矿山智能化开采和无人化作业;通过将惯性导航、全球卫星导航定位、室外GNSS定位系统组合,从而实现室内外全方面无缝衔接、立体空间定位,确保精确获取人员和设备的三维空间位置和姿态信息;利用大数据分析技术对海量的定位数据进行深入挖掘、分析及利用,提取诸如人员和设备运行模式、活动规律、潜在风险等有价值的信息,从而提前做好应对措施,优化矿山生产流程 and 安全管理流程,提高矿山的运营效率。

3.2 视觉导航/惯性导航系统组合定位技术

视觉导航系统是通过图像传感器捕获图片并对图像进行预处理,进而得到载体导航参数的一种导航技术。由于图像含有非常丰富的空间信息,并且能够最直观地展现载体所处环境条件,因而有着非常好的发展前景。将视觉导航系统和惯性导航系统进行组合,能够有效促进视觉导航发展。

3.2.1 组合定位方案可行性分析

视觉导航系统与惯性导航系统性能特点对比如表2所示。视觉导航系统环境适应性较弱,尤其在昏暗环境导航精度下降,基于这样的导航特点,将视觉导航系统与惯性导航系统组合,互补能够得到更加精准的导航系统^[16]。该组合定位方案虽能集结视觉导航系统和惯性导航系统的优点,但是自身依旧存在不足:匹配误差依然存在,在光照不均匀环境下容易出现误差,易受有色噪声干扰。

表2 视觉导航系统与惯性导航系统性能特点对比

Table 2 Comparison of performance characteristics between vision navigation system and inertial navigation system

性质特点	惯性导航系统	视觉导航系统	组合定位系统
自主性	完全自主	完全自主	完全自主
导航信息	全	不全	全
误差特性	随时间积累	与距离有关	不随时间积累
实时性	好	较好	好
更新率	高	一般	高
抗电磁	强	强	强
环境适应性	强	弱	强

3.2.2 研究现状

3.2.2.1 定位精度

孙伟等^[17]研究了一种基于证据推理的惯性导航

系统/视觉导航系统组合定位系统,可解决传统惯性导航系统/视觉导航系统因误匹配出现导航精度下降的问题。研究将证据推理与视觉里程计特征量相融合,计算所得综合置信度作为导航测量更新依据之一,达到提高导航精度的目的。为检验理论有效性,研制了演示样机进行试验。试验结果表明,基于证据推理的惯性导航/视觉导航系统组合定位精度提高了0.3%,并且计算复杂性更低,适用于工程应用。该研究详细介绍了归一化积相关匹配算法、特征值算法等多种算法,但是图片较少,使得论述不容易理解。

单目视觉本身无法测量尺度且在光照不均匀环境中会产生粗差。徐爱功等^[18]提供了一种单目视觉/惯性导航系统组合室内定位抗差方法,借助惯性导航系统提供位置信息,结合最小二乘法进行尺度恢复,利用惯性导航系统短期内高精度特点对单目增量信息进行检测并将粗差剔除。试验结果表明,该算法能有效减少单目视觉/惯性导航系统在恶劣环境下产生的粗差,提高定位精度。

3.2.2.2 算法优化

在视觉导航/惯性导航系统组合定位中,噪声往往具有相关性,有色噪声导致视觉导航/惯性导航系统组合定位滤波算法性能下降甚至完全失效。针对该问题,周小刚等^[19]利用能控性格拉姆矩阵和能观测性格拉姆矩阵判断滤波器是否一致渐进稳定,提出抗有色噪声滤波方法:对过程有色噪声采用状态扩展法,对量测有色噪声采用量测状态扩展法使得有色噪声表达式变成白色噪声表达式。仿真试验结果表明,抗有色噪声滤波方法性能稳定、有效。在本次研究中存在一些小问题,具体来说图表少且简单,对数值实例的描述不够清晰。

为提高无人机位姿估计精度,黄卫华等^[20]研发了一种新无人机组合定位算法。该算法利用灰色预测理论建立位姿解算数据的灰色模型,减小视觉导航误差对位姿估计的不利影响,采用萤火虫算法改进粒子滤波采样过程,实现粒子滤波算法改良。试验结果表明,经改良后粒子滤波算法能将位姿估计误差保持在2.3 cm左右,比其他算法在精度方面提高了39%。

根据上述研究现状可以得出以下结论:

1)在视觉导航/惯性导航系统组合定位的研究领域中,孙伟等^[17]和徐爱功等^[18]的相关探索对于推动组合定位技术的发展起到了一定的促进作用。

2)周小刚等^[19]针对有色噪声所提出的解决方案具有较高的应用价值与推广意义。在传统研究范式中,由于噪声的复杂性通常难以对其进行精准的系统建模,并且多数情况下会默认噪声为白噪声,从而在一定程度上忽视了有色噪声的深入研究。但随着未

来各类工程对于精度要求的持续攀升,组合定位技术若要契合时代发展的步伐,就必须给予有色噪声问题足够的重视,并通过深入研究来有效应对这一挑战,从而提升系统的整体性能与定位精度。

当前,众多国家纷纷加大对无人机技术的研发投入力度,这使得无人机领域取得了迅猛的发展。无人机对导航的精度、速度、实时性及信息处理能力等方面均有着严苛的要求。从战略层面考量,无人机更加侧重于图像信息的高效处理与快速传导能力,因此在未来无人机组组合定位技术的研究进程中,应将视觉导航技术作为重点关注方向,进一步强化其在无人机导航系统中的应用与创新,以提升无人机的整体性能与作业效能。

值得注意的是,无人机导航技术的发展成果能够为竖井掘进机的智能化进程提供有益的借鉴与参考,二者在技术原理与应用需求上存在着一定的共通性。鉴于此,在推动矿山智能化开采的发展过程中,应当充分汲取无人机等相关领域的先进科技成果与技术经验,通过技术的跨界融合与创新应用,促进矿山开采行业的智能化转型与升级,提升矿山开采效率、安全性与智能化水平,从而推动整个矿业产业的可持续发展。

3.3 超宽带导航/惯性导航系统组合定位技术

3.3.1 组合定位方案可行性分析

超宽带导航系统抗干扰能力强、距离分辨率可达到厘米级别,但是容易受非视距误差和不良环境因素影响。对比超宽带导航系统和惯性导航系统特点可知,二者存在互补特性,可以将二者进行组合从而获得更好的导航。该组合定位的不足之处在于:超宽带信号不稳定易丢失,定位信息受环境影响易出现异常。

3.3.2 研究现状

3.3.2.1 定位精度

信号接收不稳定一直是全球卫星导航系统面临的一个重大问题,在室内该问题出现更是频繁,单靠全球卫星导航系统很难克服。刘韬等^[21]采用超宽带导航/惯性导航系统组合定位技术来解决这一难题:惯性导航系统推算载体位置和速度,并用超宽带导航解算载体位置和速度,得到2组测量数据,再用卡尔曼滤波器对2组数据进行分析得到最优估计。针对该理论结果进行一次实物试验,试验结果表明,超宽带导航/惯性导航系统组合定位能够有效抑制非视距误差对导航结果影响,导航精度、稳定性、可靠性和适用性得到提高。

为实现智能采运机端部自主校准定位,避免因停机影响施工进度,葛世荣等^[22]采用了超宽带导航/惯

性导航系统组合定位技术。超宽带导航系统获取采运机端头定位数据,利用扩展卡尔曼滤波算法将所得数据进行平滑处理,从而获得更高精度的位置估计数据。为进一步提高定位精度,建立了基于惯性导航系统和超宽带导航系统的融合方程,在获得采运机端头定位数据的同时还能有效补偿惯性导航系统的零偏。

3.3.2.2 算法优化

超宽带导航/惯性导航系统组合定位在导航期间存在定位信息异常、短时缺失等问题。针对该问题田广亮等^[23]提出了SVR(Support Vector Regression, SVR)辅助改进鲁棒卡尔曼滤波的超宽带导航/惯性导航系统组合定位技术。在定位信息正常时采用RKF(Robust Kalman Filter, RKF)估计位置误差,在定位信息出现异常时采用在线训练的SVR模型预测位置误差。针对该方案进行实物试验,试验结果表明:该方法能明显提高算法性能,在超宽带导航信号正常时,可以使误差减小33%;超宽带导航信号出现异常时,仍然能持续有效定位。

在全球卫星导航系统的范畴内,信号接收始终是一项极具挑战性的难题,长期以来困扰着该领域的发展。然而,刘韬等^[21]提出的超宽带导航/惯性导航系统组合定位方案及田广亮等^[23]针对超宽带导航/惯性导航系统组合定位信号问题所设计的改进方案,为攻克这一难题开辟了崭新的思维路径和可行方向。

尽管组合定位技术在应对部分导航问题上展现出了显著的优势和良好的效果,能够整合不同导航系统的长处,实现性能的优化与互补,但组合定位并非完美无缺,其自身同样存在着诸多亟待解决的问题。即使是选取2个互补特性极为出色的导航系统进行组合,也难以确保在实际应用中不会出现任何故障或偏差。因此,在探索解决各类导航问题的征程中,应当将理论研究与实践操作紧密结合在一起,给予实践环节足够的重视。只有通过大量的实践活动,深入到实际的应用场景中去,才能够精准地发现隐藏在理论设计背后的问题,从而有的放矢地对组合定位方案进行优化和完善,推动全球卫星导航系统朝着更加稳定、精准、高效的方向发展,为众多依赖导航技术的领域提供更为可靠的定位服务和技术支撑。

4 轨迹跟踪研究现状

金属矿山硬质地层施工工况复杂、环境恶劣,人工操作掘进机施工存在危险性高、劳动强度大、施工质量难以保证、超挖、欠挖等问题。因此,研发高效协同、精准、稳定的智能化施工设备有利于工程发展。为实现施工机械智能化作业,就必须捕获施工机械在工作空间的绝对位置,并对其运行轨迹进行控制,最

终实现无人化施工。

学术界针对掘进机轨迹跟踪进行了深入研究,取得了丰富的研究成果。刘送永等^[24-25]使用单目视觉和深度学习算法检测掘进机姿态,并配合模糊控制算法实现定点切割,最终试验结果表明,最大轮廓误差在 50 mm 以内。此外,其还针对掘进机运行过程中因滑移导致运行轨迹偏离问题进行了研究,提出一种巷道掘进机定向航行轨迹跟踪控制方案,该方案配合 PID (Proportion Integration Differentiation, PID) 速度控制器可将圆弧段最大位置误差控制在 1.5 % 以内;张旭辉等^[26]提出一种迭代学习与滑模控制相结合的轨迹跟踪控制算法,实现了对悬臂式掘进机截割头运行轨迹的精准控制,并且利用 Solidworks、3Dmax、Unity3D 等软件构建了虚拟示教系统,解决了人工示教难以保证轨迹优化及合理性的弊端;张国泰等^[27]提出一种滑模控制方法,确保悬臂式掘进机截割头部运行轨迹不会受到外界未知干扰、系统非线性及参数不确定性等因素影响;张旭辉等^[28]以激光点为目标特征建立掘进机机身位姿测量系统,利用单目视觉测量技术实现了掘进机自动定向掘进控制。

从上述内容可知,目前学术界主要是针对悬臂式掘进机进行研究,控制核心是通过机械臂控制截割头按照预设定轨迹进行移动,其控制目标及运动模式针对性强、不具备普遍性;使用单目视觉测量技术能够准确获取悬臂式掘进机机身姿态,但是该技术主要运用场景为巷道,无法确定是否能够应用于竖井挖掘工程。

在机体运动系统的控制研究领域,构建精准的机体运动系统模型面临着相当大的挑战^[29-30]。这主要归因于机体自身结构的复杂性及运行过程中所涉及的众多因素。机械部件之间存在着高度非线性的耦合关系,而且在不同的工况条件下,其力学特性也会发生显著变化,这些都使得建立一个能够精确反映机体运动状态的模型变得异常艰难^[31-32]。不仅需要对大量复杂的物理现象进行细致考量,还需耗费大量的时间与精力进行反复调试与验证,但即便如此,最终模型的准确性与可靠性仍然难以完全达到理想状态。

与此同时,破岩机械在实际的工程作业中,所处的环境条件极为复杂且充满不确定性。地质条件的不均匀分布、岩石硬度的随机变化、施工现场持续存在的振动和噪声干扰等诸多因素,都会对机体的稳定运行产生不容忽视的影响^[33-34],使得机体的实际运动状态与预期状态之间产生较大偏差,进而极大地增加了对其进行精准控制的难度。

基于上述情况,对于像 LQR (线性二次型调节器) 和 MPC (模型预测控制) 这类对系统模型精确性有着较高要求的控制算法而言,在破岩机械的控制应用中

就暴露出明显的局限性。LQR 算法实施前提是必须已知精确的系统状态空间模型及明确的性能指标函数,然后通过求解复杂的 Riccati 方程才能获得所谓的最优控制律,然而在实际的破岩机械运行环境中,要满足这些条件几乎是不可能的。同样,MPC 算法依赖于精准的预测模型来对未来系统的行为进行预估,并依据优化目标求解出最优的控制序列,但由于破岩机械所处环境的高度复杂性和不确定性,使得预测模型难以准确地反映实际情况,从而导致该算法在实际应用中的效果大打折扣。

相较而言,PID (比例-积分-微分) 算法展现出诸多独特的优势,使其更适用于破岩机械的控制场景。从原理上讲,PID 算法简洁明了,易于理解和掌握,操作人员能够快速上手并进行有效的参数调整。在控制精度方面,它能够通过合理地设置比例、积分和微分 3 个参数,实现对系统输出的精确控制,确保破岩机械在作业过程中能够保持稳定且精准的运行状态。尤为重要的是,PID 算法并不依赖于精确的系统模型,这使其在面对复杂多变的工程环境和机体运行状态时,依然能够发挥出良好的控制效果,有效克服了由于模型不准确或环境干扰所带来的问题,具有较强的抗干扰能力,能够保证破岩机械在各种不利条件下稳定运行。

此外,PID 算法还具有巨大的发展潜力和良好的可扩展性。它能够与多种先进的优化算法相结合,如粒子群优化算法、遗传算法等,通过这些算法对 PID 算法参数进行优化,从而进一步提升其控制性能,有效解决传统 PID 算法在参数选择和优化方面可能存在的问题。综上所述,鉴于 PID 算法在破岩机械控制领域所展现出的独特优势及巨大的发展潜力,将其作为金属矿山硬质地层智能掘进机械控制技术的重要研究方向具有重要的理论意义和实际应用价值,有望为破岩机械的高效、稳定运行提供强有力的技术支持,推动相关工程领域的技术进步与发展。

5 新型矿山智能掘进设备

新型竖井掘进机作为矿山智能掘进领域的创新成果,凭借其别具一格的机身构造和独特的破岩原理,成功突破了传统竖井掘进机所存在的机身沉重、施工灵活性欠佳等固有局限。在本章节中,着重对新型竖井掘进机的结构设计、工作机制及其井下组合定位方案进行详细阐述,旨在深入剖析这一新型设备在竖井掘进工程中的关键技术与应用优势,呈现其在提升竖井掘进效率、保障施工精度与安全性等方面的重要价值与创新之处,从而更好地推动矿山智能化掘进技术的发展与应用。

5.1 新型竖井掘进机结构

新型竖井掘进机(如图4所示)由驱动系统、掘进

系统组成,还包括液压泵、液压马达等硬件。

新型竖井掘进机破岩流程如图5-a)所示。首先,

单位为毫米

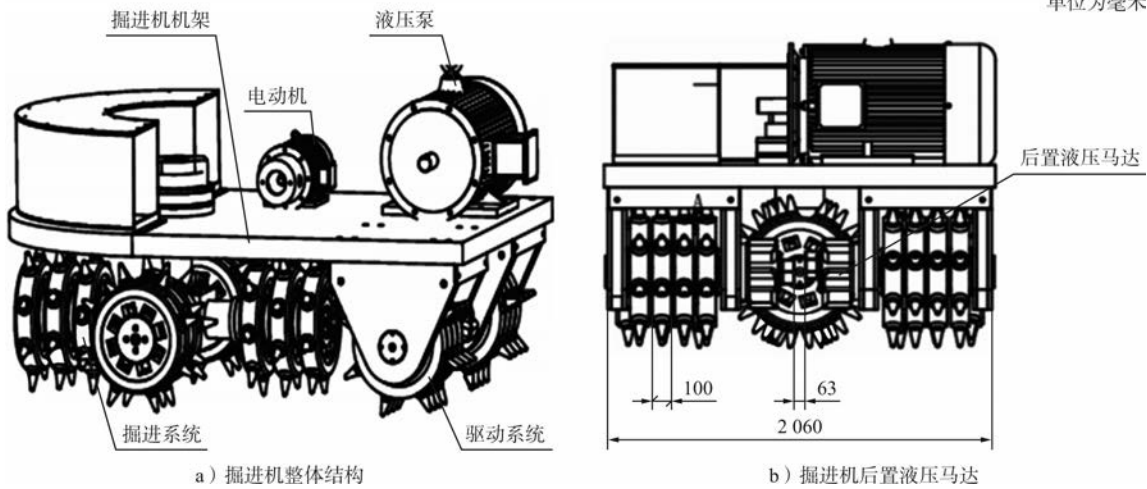


图4 新型竖井掘进机结构设计

Fig. 4 Structural design for the new-type vertical shaft excavator

在掘进系统与岩石接触后利用自重使截齿侵入岩石;然后,液压马达带动滚筒转动,滚筒上截齿借由旋转惯性对岩石进行破碎化处理^[18]。破岩效果如图5-b)所示。由图5-b)可知,依据上述破岩流程能够对混

凝土进行完全破碎化处理。在完成破碎任务后由驱动系统带动掘进机前往下一个破碎任务点继续作业,循环以上步骤直至完成竖井挖掘。

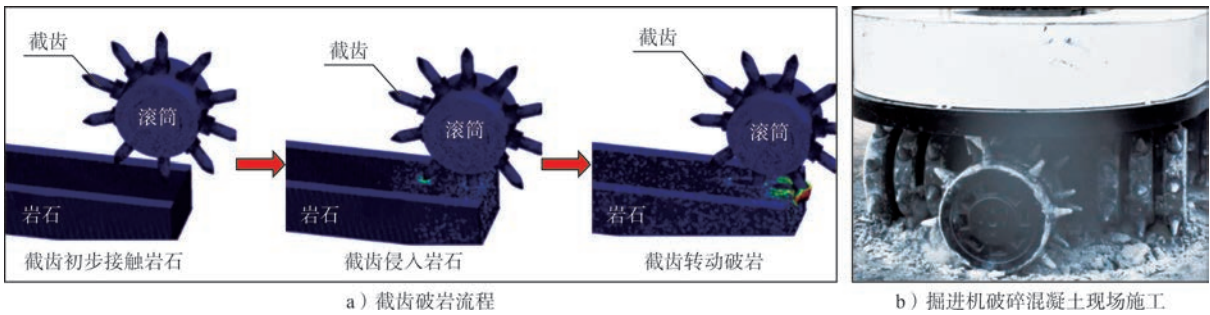


图5 截齿破岩流程和现场施工图

Fig. 5 Flowchart of rock breaking by picks and its onsite operation

5.2 组合定位方案

新型竖井掘进机组定位原理如图6所示,超宽带定位系统采用双向双边测距法,通过测量掘进机与

基站距离,得到掘进机与超宽带基站的位置关系,经过坐标系转换后可获得掘进机井下位置。

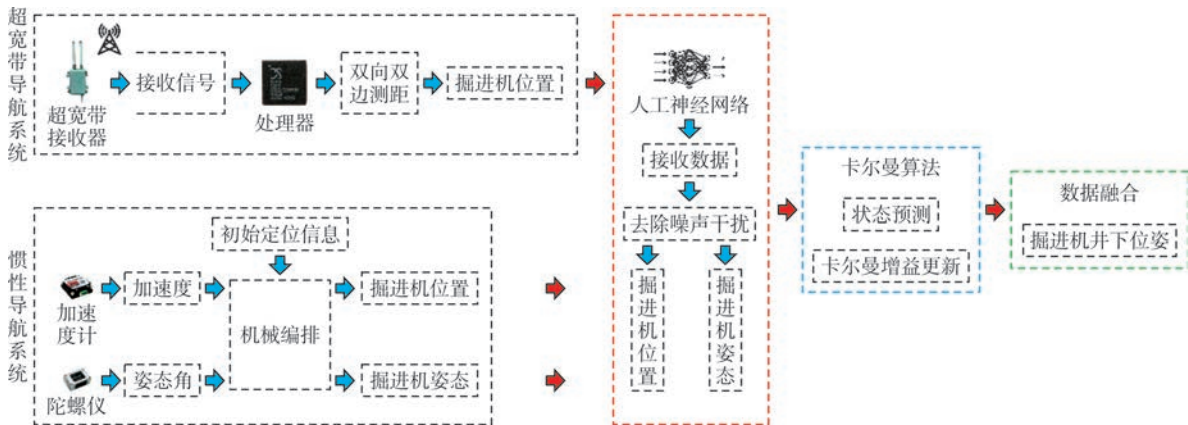


图6 新型竖井掘进机组定位原理

Fig. 6 Mechanism of the new-type vertical shaft excavator positioning by combinations

5.3 组合定位算法

5.3.1 神经网络算法

人工神经网络算法是一种具有自适应能力的数学模型(如图7所示),其分为输入层、隐藏层和输出层,调节隐藏层单元个数能够快速、准确地寻找数据规律并确定拟合函数。在组合定位中分别使用超宽带导航系统、惯性导航系统对掘进机进行定位,获得定位数据、速度数据和位姿数据后将每一组数据分为训练数据和测试数据,然后利用训练数据对人工神经网络模型进行训练(如图8所示),再利用测试数据对训练后模型进行测试,测试通过后可生成相应的拟合函数。利用拟合函数对定位数据进行处理,提高数据精度。

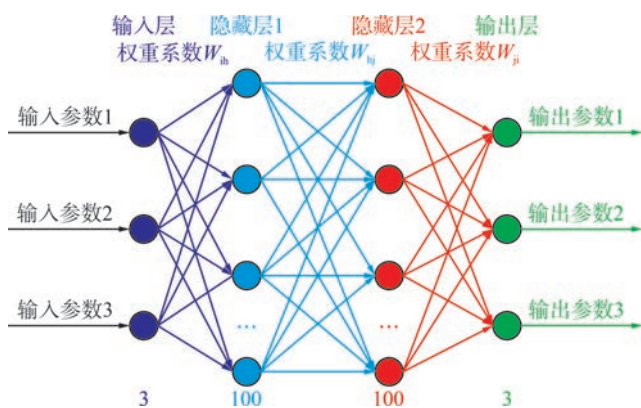


图7 人工神经网络模型图

Fig. 7 Model of artificial neural networks

5.3.2 卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波算法能够将影响数据精度的干扰噪声减小,以提高数据精度。以下为卡尔曼滤波函数5个核心公式。

先验估计:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{A}_k \mathbf{X}_{k-1} \quad (1)$$

后验估计:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{X}_k + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H} \mathbf{X}_k) \quad (2)$$

卡尔曼增益:

$$\mathbf{K}_k = \frac{\mathbf{P}_k \mathbf{H}^T}{\mathbf{H} \mathbf{P}_k \mathbf{H}^T + \mathbf{R}} \quad (3)$$

$$\mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ v_k \\ \theta_k \\ \omega_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_k}{\omega_k} [\sin(\omega \Delta t + \theta) - \sin \theta] \\ \frac{v_k}{\omega_k} [-\cos(\omega \Delta t + \theta) + \cos \theta] \\ 0 \\ \omega \Delta t \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.5 a_{v,k} \cos \theta \Delta t^2 \\ 0.5 a_{v,k} \sin \theta \Delta t^2 \\ a_{v,k} \Delta t \\ 0.5 a_{\omega,k} \Delta t^2 \\ a_{\omega,k} \Delta t \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: x_k 为 k 时刻掘进机东向坐标; y_k 为 k 时刻掘进机北向坐标; v_k 为 k 时刻掘进机径向速度; θ_k 为 k 时刻掘

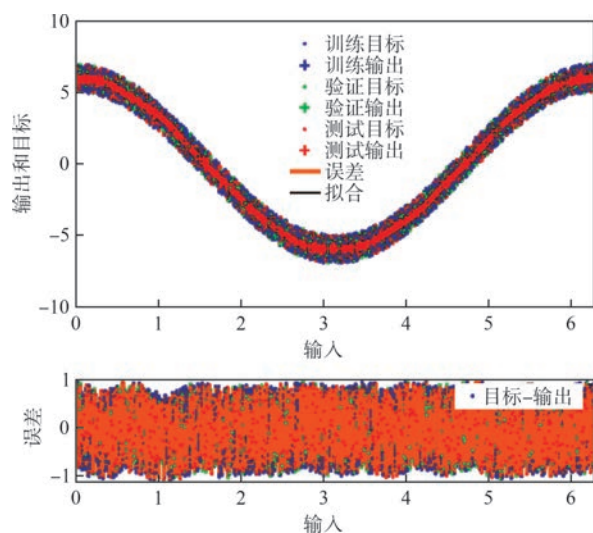


图8 人工神经网络软件拟合界面

Fig. 8 Fitting interface of artificial neural networks software

先验估计协方差:

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{A}_k \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q} \quad (4)$$

更新估计协方差:

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k \quad (5)$$

式中: $\mathbf{X}_k$ 为 k 时刻状态向量; $\mathbf{A}_k$ 为 k 时刻状态矩阵; $\mathbf{X}_k$ 为 k 时刻的估计状态向量; $\mathbf{Z}_k$ 为 k 时刻的观测向量; $\mathbf{H}$ 为观测矩阵; $\mathbf{K}_k$ 为 k 时刻卡尔曼增益; $\mathbf{P}_k$ 为 k 时刻先验估计协方差; $\mathbf{P}_k$ 为 k 时刻更新估计协方差; $\mathbf{Q}$ 为过程噪声的协方差矩阵; $\mathbf{R}$ 为观测误差矩阵; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。

使用卡尔曼滤波算法需要对目标建立相应状态方程和观测方程,构建过程如下:

1) 状态方程。新型竖井掘进机井下行驶以圆形路线为主,可将其运动模型视为 CTRV (Constant Turn Rate and Velocity, CTRV) 模型,在实际运行过程中因机器运行和外界干扰使得掘进机很难保证匀速行驶,由高斯理论可知,自然界误差遵循正态分布,因而根据 CTRV 模型和噪声误差来源及特性可得新型竖井掘进机状态方程为:

进机偏航角; ω_k 为 k 时刻掘进机偏航角速度; Δt 为时间点间隔; $a_{v,k}$ 为 k 时刻径向加速度; $a_{\omega,k}$ 为 k 时刻偏航

角加速度。

$$\text{其中, } \begin{bmatrix} 0.5a_{v,k} \cos \theta \Delta t^2 \\ 0.5a_{v,k} \sin \theta \Delta t^2 \\ a_{v,k} \Delta t \\ 0.5a_{\omega,k} \Delta t^2 \\ a_{\omega,k} \Delta t \end{bmatrix} \text{ 为掘进机运行噪声干扰,}$$

而 $a_{v,k}$ 、 $a_{\omega,k}$ 等参数符合正态分布。

2)观测方程。卡尔曼滤波的观测方程可以表示为:

$$z_k = h(x) + v \quad (7)$$

式中: x 为过程噪声; v 为测量噪声。

由于卡尔曼滤波状态矢量 X 中包括惯性导航系统的误差,相应测量矢量 z_k 包括惯性导航系统预测值与相应的超宽带导航系统量测值之差,即:

$$\delta z_k = \begin{bmatrix} r_{\text{INS}}^l - r_{\text{UWB}}^l \\ v_{\text{INS}}^l - v_{\text{UWB}}^l \end{bmatrix} \quad (8)$$

6 展 望

目前中国金属矿山硬质地层智能化掘进处于初级阶段,需要提升信息收集、信息深度处理、信息融合等能力,对已有信息进行深度分析、挖掘、融合以达到对掘进机工作环境更深层次掌握,推出符合工程要求的智能化技术,尤其是掘进机高精度导航技术。主要可从以下2个方面进行提升:

1)发展以惯性导航系统、超宽带导航系统及视觉定位导航系统为核心的组合定位技术。组合定位系统要求能够不受工程环境干扰,并且获取包括机体位置、速度及姿态在内的全面定位信息。

2)研究滤波算法。注重滤波算法实际应用,为理论研究提供更多应用实例,深入挖掘滤波算法实际需求,为滤波算法研究指明方向。获知研究方向后尝试利用新的数学模型来描述信号,尽可能准确地描述实际工况,此外还可以改进滤波算法硬件架构进而提高计算效率和实用性。

金属矿山硬质地层智能化掘进不单是导航系统和轨迹跟踪控制智能化,而是更为全面的智能化,应重视研究新型掘进机。目前掘进机械或是自身重力过大、不灵活,或是挖掘尺寸受限,不能很好地满足工程需求。进一步发展掘进机械需要针对机身款式进行创新,推出更多小巧、灵活且挖掘尺寸不受限制的掘进机械。目前智能化是大势所趋,金属矿山硬质地层智能化掘进不能局限于自身行业,可以通过借鉴其他行业智能化发展获得更为先进的导航、滤波算法及其他技术,进而促进矿业行业发展。

[参 考 文 献]

- [1] 周桂生. 柴北缘早古生代超高压岩石差异性变质演化:对大陆深俯冲岩石折返机制的启示[D]. 北京:中国地质科学院, 2019.
- [2] ZHOU Y U, LV W J, LI B. A realistic 3D grain-based modeling approach for reproducing the mechanical and failure behavior of brittle granites[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2025, 185: 105981.
- [3] 张将令, 李小二, 陈新明, 等. 截齿滚动掘进冻土过程的影响因素数值模拟研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1): 229-240.
- [4] 陈新明, 张将令, 焦华皓, 等. 新型重力式立井连续掘进机滚动截齿破岩机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(3): 576-583, 597.
- [5] 唐先习, 夏顶顶, 李旦合, 等. 隧道爆破施工对初支混凝土的影响研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(1): 73-78, 113.
- [6] 王桂林, 费鸿禄, 刘秉轩, 等. 露天煤矿火区爆破技术现状与趋势[J/OL]. 煤炭科学技术, 1-18[2024-10-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240902.1359.011.html>.
- [7] 汪青仓, 刘全辉, 宋朝阳, 等. 煤矿超长斜井敞开式全断面掘进机施工可行性分析[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 310-320.
- [8] 代恩虎, 王勇, 鲁义强, 等. 云贵地区煤矿TBM施工技术应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(10): 10-18.
- [9] 童碧, 陈建本, 孙涛. 小型巷道全断面掘进机快速施工关键技术与应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 185-197.
- [10] 秦永元. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2012: 282-283.
- [11] 刘少山. 无人驾驶——人工智能如何颠覆汽车[M]. 北京:机械工业出版社, 2019: 15-16, 22.
- [12] 陈刚, 王一帆, 傅金琳, 等. 惯导速度辅助下GNSS高精度定位[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(4): 466-472.
- [13] 李博峰, 陈广鄂. GNSS/INS组合车辆协同精密定位方法[J]. 测绘学报, 2022, 51(8): 1 708-1 716.
- [14] 商向永, 孙付平, 张伦东, 等. INS辅助的GNSS欺骗干扰辨识与抑制方法[J]. 中国惯性技术学报, 2022, 30(2): 181-187.
- [15] 林雪原, 刘丽丽, 董云云, 等. 改进的GNSS/INS组合导航系统自适应滤波算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1): 127-134.
- [16] 吴腾, 赵军阳, 张志利, 等. 车载视觉里程计发展现状与趋势研究[J]. 电光与控制, 2017, 24(10): 69-74.
- [17] 孙伟, 苗宏胜, 李海军, 等. 一种基于证据推理的惯性/视觉里程计深组合导航方法[J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(5): 615-623.
- [18] 徐爱功, 宋帅, 隋心, 等. 一种单目视觉/INS组合室内定位抗差方法[J]. 测绘科学, 2019, 44(12): 1-6.
- [19] 周小刚, 刘洁瑜, 汪立新, 等. 视觉/惯性导航系统抗有色噪声滤波算法设计与仿真[J]. 现代防御技术, 2015, 43(2): 199-202, 209.
- [20] 黄卫华, 何佳乐, 陈阳, 等. 基于灰色模型和改进粒子滤波的无人机视觉/INS导航算法[J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(4): 459-466.
- [21] 刘韬, 徐爱功, 隋心. 超宽带与惯性导航系统组合的室内导航定

位[J].测绘科学,2016,41(12):162-166.

[22] 葛世荣,王世佳,曹波,等.智能采运机组自主定位原理与技术[J].煤炭学报,2022,47(1):75-86.

[23] 田广亮,张丽杰,李志宇.SVR辅助改进鲁棒卡尔曼滤波的UWB/INS组合定位方法[J].电子测量技术,2022,45(3):79-84.

[24] 刘送永,吴洪状,程诚,等.煤矿掘进机自定位截割控制方法及试验研究[J].中国机械工程,2024,35(7):1 318-1 329.

[25] 刘送永,张德义,孟德远,等.巷道掘进机循迹定向航行控制研究[J/OL].机械工程学,1-11[2024-10-14].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.th.20250211.1702.050.html>.

[26] 张旭辉,王甜,张超,等.数字孪生驱动的悬臂式掘进机虚拟示教记忆截割方法[J].煤炭学报,2023,48(11):4 247-4 260.

[27] 张国泰,沈刚,汤裕,等.基于UDE的掘进机器人非奇异终端滑模控制[J].煤炭学报,2023,48(增刊2):790-801.

[28] 张旭辉,赵建勋,杨文娟,等.悬臂式掘进机视觉导航与定向掘进控制技术[J].煤炭学报,2021,46(7):2 186-2 196.

[29] 杨小慧.某金矿选矿厂球磨机衬板及分级设备优化改造[J].黄金,2022,43(7):50-53.

[30] 王润年,王永辉.5G+无人驾驶智能配矿行车在有色冶炼企业的应用研究[J/OL].黄金,1-5[2024-10-02].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1110.TF.20240810.1039.002.html>.

[31] 胡荣华,安冬,史梦圆,等.智能矿用机器人研究现状及发展趋势[J].黄金,2023,44(9):59-68.

[32] 高飞翔,刘金凤,李家玮,等.基于PLC技术的黄金矿山排水系统自动控制研究与应用[J].黄金,2023,44(10):30-33.

[33] 武茂超,万鹏,姚树标.基于悬臂掘进机性能的矿岩综合分级方法[J].黄金,2023,44(10):4-8.

[34] 董志富,翟会超,刘银,等.特殊条件下露天矿山非常规爆破技术及其应用[J].黄金,2021,42(8):48-52.

Status quo and prospects of intelligent excavation
through hard strata in metal mines

Chen Xinming^{1,2}, Sun Jinyu^{1,2}, Jiao Huazhe^{1,2}, Wang Qi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Underground Engineering and Disaster Prevention, Henan Polytechnic University;
2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University)

Abstract:The key point of intelligent excavation technology, a trend for hard strata excavation in metal mines, lies in the technologies of positioning by combinations and trajectory tracking control. The study elaborated on the achievements in strata excavation technology, and navigation and positioning technology made in each stage, and dissected the shortcomings in technological terms while exploring the development regularities. The existing achievements made in positioning by combinations and trajectory tracking are comprehensively reviewed and commented objectively, before a set of schemes for positioning by combinations are devised specifically for new-type intelligent excavation equipment for mines. Finally, the development trend and research focus of intelligent excavation through hard strata in metal mines are prospected in a reasonable way.

Keywords:metal mine; hard strata; excavation technology; excavation equipment; positioning by combinations; trajectory tracking; intelligent excavation