引文格式：黄康,孔维霄,李卫强,等. 煤矿井下地磁定位的日变研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(11): 83-86. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.11.016

煤矿井下地磁定位的日变研究

黄　康[1]，孔维霄[1]，李卫强[1*]，史伊蕾[1]，张丁尹[1]
（1. 河北工程大学，河北 邯郸 056038）

摘　要：近年来定位技术发展十分迅速，其中井下定位技术成为研究热点。在井下突发人员逃生、救援定位与导航等应急情况时，地磁定位可在无网络、无电时利用单兵PDA中内置的地磁基准图进行精准定位。首先分析了井下地磁定位的机理，并构建了井下地磁定位框架；再针对井下地磁的扰动现象进行日变测量，并分析了其变化规律。多项实验结果表明，在无干扰条件下，井下地磁变化较小且呈周期性变化。

关键词：井下地磁；日变规律；地磁定位；日变改正值；井下避险
中图分类号：P318　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）11-0083-04

Research on Daily Variation of Underground Geomagnetic Positioning in Coal Mine

HUANG Kang[1], KONG Weixiao[1], LI Weiqiang[1], SHI Yilei[1], ZHANG Dingyin[1]
(1. Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: In recent years, positioning technology has developed rapidly, among which underground positioning technology is a research hotspot. As a new type of positioning technology, geomagnetic positioning is widely favored by researchers in underground emergency situations, such as personnel evacuation and rescue positioning and navigation. It can achieve precise positioning when there is no network or electricity, using the geomagnetic reference map built-in in individual PDAs. In this study, we analyzed the mechanism of underground geomagnetic positioning, and constructed a framework for underground geomagnetic positioning at first. And then, we conducted daily variation measurement for the disturbance phenomenon of underground geomagnetism, and analyzed its variation pattern. Multiple experimental data show that under undisturbed conditions, underground geomagnetic changes are small and exhibit periodic changes.

Key words: underground geomagnetism, daily variation rule, geomagnetic positioning, daily variation correction value, underground risk avoidance

随着人类对探索空间位置的渴望程度更加深入，对定位的要求也越来越高。各类定位技术取得了骄人的成绩，应用范围已由运输系统、测绘等领域推广到众多行业，应用方向更加丰富，尤其是以空间定位为基础的导航定位技术被广泛应用于军事、民用领域，彰显出举足轻重的作用[1-5]。传感器的创新和发展使得空间定位技术更加精进，目前的定位技术主要包括两类：①以北斗卫星为代表的GNSS定位技术，主要服务于室外定位[6-9]；②漏泄通信、载波通信、RFID、ZigBee、WiFi等无线数据传输技术，可服务于井下定位。综合分析这些定位技术发现，其仍存在一定的不足[10]，如GNSS定位技术虽能很好地服务于室外场景，但对复杂的室内环境却束手无策，究其根本是其信号强度受到不同程度的干扰，如矿井、井下、水下等应用场景[11]，不能达到定位要求。因此，井下定位往往需要借助于新型传感器或其他信号，从而在不依赖卫星信号的情况下达到定位要求。学者们对井下定位技术进行了广泛研究，如构建INS联合地磁导航定位系统、基于地磁匹配中相关度和滤波算法的研究等，为井下定位提供了理论依据和技术支持[1,12]。井下地磁定位不仅能让使用者在定位终端实时获取自己的坐标信息，而且一旦井下发生事故，使用者能迅速利用地磁定位终端及时掌握自己的位置并获取最优的逃生路线[13]。由于定位数据库可内置在有地磁测量功能的移动PDA上，定位数据的精度决定了人员定位逃生的精度，因此地磁数据库获取的准确性是研究的关

收稿日期：2023-08-05。
项目来源：大中学生科技创新能力培育专项资助项目（22E50129D）；省级大学生创新创业训练计划项目（S202210076020）。
第一作者简介：黄康（2002—），本科在读，研究方向为井下开采方法、地磁定位技术应用，E-mail：huangkanghebeu@163.com。
通信作者：李卫强（1990—），硕士，实验师，研究方向为大地测量数据处理及误差分析、地学计算与模型模拟、GNSS坐标定位技术，E-mail：996947433@qq.com。

键[14]。分析其特点发现，地磁往往存在长期或短期的规律变化，因此掌握地磁日变规律，是研究地磁定位的重要环节之一[15]。

1 地磁定位与日变理论

1.1 地磁定位原理

井下地磁定位原理见图1，基准数据的获取主要依靠高精度的地磁采集设备，通过数据建模、融合坐标地理信息与地磁相关数据，构建井下地磁定位基准数据库，以备在定位过程中匹配信息[16-17]。

1）当井下网络正常运行且有电时，井下人员能将实时定位信息显示到便携终端上，并可通过搭载多种传感器，与井下已有通电定位设备进行信息互联与校正定位，以提高精度水平。井下人员通过行走空间磁场信息可实现实时匹配定位，将相关地磁定位信息传递至井下监控平台，生成井下人员定位信息，供管理者实时查看。

2）当井下遇到紧急状况时，在无法供电或信号中断的情况下，井下人员可利用随身携带的地磁定位装置实时采集地磁信息数据，与定位PDA中的地磁基准图进行匹配，实时显示人员在基准图中的位置，实现自主单兵定位。对于高风险安全隐患地区，还能结合GIS路径分析等相关技术，通过分析定位场景周围的避险设施，选择合理的避险路径。

井下地磁定位匹配技术主要是利用数据的拟合相关性，将实时地磁数据与提前构建的数据库进行匹配，以获取定位坐标。其中，地磁探测技术不仅需考虑周围环境噪声的影响，还需研究地磁获取中的时域变化，如日变、年变或更长时间的变化。

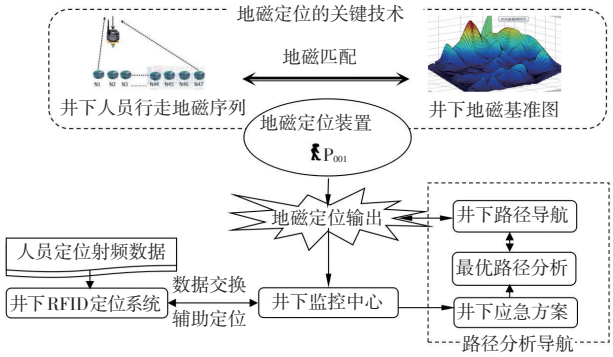


图1 井下地磁定位原理

1.2 地磁日变理论

磁场时域变化机理通常分为两种：①由地球内部磁场发生的缓慢变化所致，这类变化周期长、随时间变化缓慢，对磁场测量过程的影响很小，可忽略该变化近似作为稳定磁场进行研究[18]；②地球短时间内的变化，一方面是呈现周期规律的连续变化（平静变化），通常变化平缓、规律性较强，另一方面是在极短时间内形成的急剧变化，变化幅度不定，变化大小一般是磁暴、地磁脉动和与变化磁场有关的电磁感应等。根据周期和幅度，平静变化包括平静的太阳日变化、太阴日变化和年变化等，太阳日变化是指以24 h为一个周期的地磁变化，又叫做日变，通常变化幅度为几nT到几十nT；太阴日变化是指地球相对月球自转一周的地磁变化，变化幅度很小，通常为1~2 nT；年变化是指以一年为一个周期的地磁变化，主要受季节的影响，极值出现在夏季和冬季，变化幅度约为15~30 nT。

地磁研究主要是分析磁测过程中的变化对测量精度的影响，研究各种地磁变化的特点，由于太阴日变化和年变化在一天时间内变化幅度较小，对于该变化的分析往往叠加到地磁日变研究中，即将其整体作为地磁日变化进行测量分析[19]，因此在考虑地磁定位精度影响因素时，地磁日变化是一项重要的误差来源，需要通过分析研究区域的地磁日变场，测量定位区域中的地磁日变规律，进而分析在定位基准构建和实时定位过程中由于时间差产生的定位精度影响。《地面高精度磁测规程》对地磁测量日变观测也做了规范要求。地磁匹配定位前期研究的工作重点是井下地磁日变[20-21]。

2 地磁日变数据的采集与整理

2.1 实验设备

为探究井下地磁日变规律，本文选取井下地磁定位中的主要特征点，对巷道内固定点进行连续地磁测量。参照《地面高精度磁测规程》，实验采用高精度的质子磁力设备ENVI-PRO质子磁力仪（图2）进行地磁日变磁测。利用高精度质子探头采集地磁数据，能够完成总磁场强度等一系列磁场测量，在测量过程中可设置不同的采集频率，具有测量精度高的优点。仪器参数见表1。



图2 ENVI-PRO质子磁力仪

2.2 实验方案

矿井下地质条件复杂，巷道交错分布，实验利用质子磁力仪对巷道中某一固定位置进行连续地磁日变观测。整个测量过程主要研究地磁的日变情况，分为3次测量，以3个太阳日的连续24 h为观测时间，测量时间周期为7 d，以减小误差的偶然性。为保证磁测的准

表1　ENVI-PRO磁力仪测量主要参数

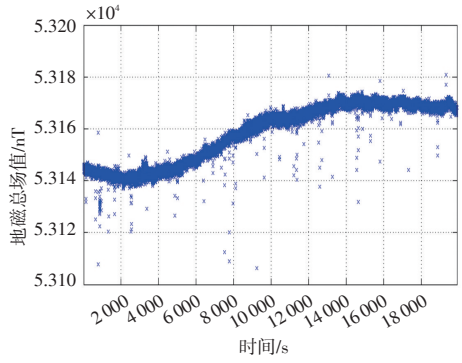
仪器名称	参数值
主机	250 mm×152 mm×55 mm；2.45 kg含蓄电池
电源	12 V、2.9 AH可充电铅蓄电池；基站测量可以外接12 V输入
工作温度	-40~60℃
调谐与采样	手动或自动调谐，由键盘选择每次测量的采样时间（0.5 s、1 s、2 s、3 s）
灵敏度	0.1 nT（采样时间为2 s）
测量绝对精度	±1 nT
内存容量	总测量数据为84 000，梯度测量数据为67 000，基站测量数据为500 000
测量范围	23 000~100 000 nT

确性和数据的全面性，将仪器采样频率设置为2 s，一个太阳日对固定位置点的数据采集量为43 200次，并对采集数据进行整理；再利用Matlab软件对数据进行分析处理，绘制地磁日变观测的散点图和曲线图，并对整体图进行宏观分析，总结其特征规律；然后进行微观分析，选择短时间段研究采样数据，通过滤波、噪声与曲线拟合等手段消除多种因素影响，得出日变化曲线，分析其地磁变化规律；最后得出相关结论。

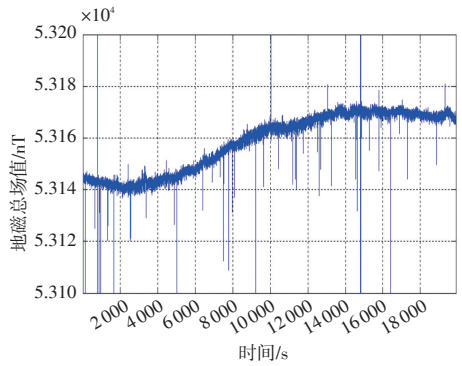
2.3　实验结果与分析

地磁日变观测的散点图和曲线图见图3，可以看出，地磁数据除各边时期有部分离散点位外，大量点位集中在一个位置范围，说明地磁日变在单点测量过程中除个别扰动外，短时间变化较小；但日变曲线存在个别极短时间内发生高频率波动现象，根据相关理论，其原因主要是存在严重的噪声干扰，使得极短时间地磁瞬时发生较大波动。

为研究磁总场整日时间段的地磁变化，在每个小时内选取0~5 min和30~35 min两个时段作为采样数据。为避免粗差和较大噪声的影响，采用滤波等手段去除噪声。对采样的多组5 min数据求取均方差发现，5 min内的误差接近于1 nT，证明磁场变化相对缓慢，因此可将测量数据取均值作为该中间时刻（即2.5 min）地磁的测量值，并利用该均值进行曲线拟合。测量中3次地磁的日变化曲线见图4，可以看出，地磁在单独一天内呈现周期变化，即约24 h为一个地磁日变周期；地磁变化在6~18 h呈现较大变化，分别在6~8 h和12~16 h出现两个地磁变化峰值，且随着时间的推移，约在22~24 h时段变化较缓慢并趋于稳定；单日地磁变化波动最大的区间为12~14 h，3天观测过程中单点磁场变化最大值与最小值之间的差值约为50 nT。综上所述，井下地磁白天变化较大、夜间变化较小，且磁场最大值与最小值的差值不超过50 nT，因此构建井下地磁基准图时，为尽可能降低扰



a　日变散点图



b　日变曲线图

图3　地磁日变测量数据

动变化量、提高定位准确性，可选择夜晚获取地磁数据，并可根据地磁日变波动时间加入相应的日变修正实测定位数据[22]。

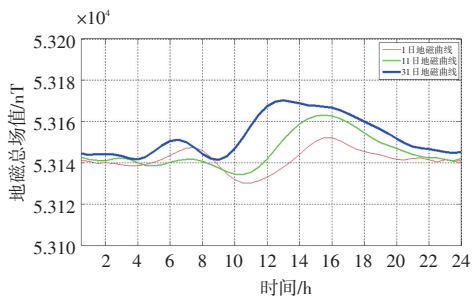


图4　3次观测的地磁日变曲线

根据测量误差理论，当测量误差超过中误差3倍时，将其作为粗差剔除。由于地磁日变研究分析过程中同一点位在相近时刻变化平缓，因此当邻近时刻超过50 nT的两倍时，须考虑利用滤波、去噪等方法对地磁数据进行平滑处理。若测量时段无法选择夜晚，则须建立相应的时间磁变模型对数据进行矫正，统一归算到0点时刻，以避免不同测量时段地磁日变漂移对地磁基础数据的影响。

3　结　语

传统卫星定位技术主要是在露天接收卫星信号进行作业，而矿井定位往往需要在有电、有网的模式下

进行。本文结合地磁场的特点，构建了一种新型井下定位机制，可在无网、无电的情况下利用PDA进行单兵定位。

本文通过构建地磁模型分析了定位区域的日变情况，在无扰动情况下，地磁整体上呈现日变现象。在一天之中的12~14 h，地磁变化较强烈。多次测量中单点最大值与最小值的差值为50 nT，因此在地磁匹配过程中，应根据周围环境扰动场的变化，适度考虑地磁日变对匹配的影响。

当环境场变化中误差小于50 nT的3倍时，可不考虑日变影响。对于偶然的较大磁场干扰，可记录日变监测时间，利用滤波、去噪等方法去除噪声。针对不同时刻的地磁测量数据，可根据测量时间适当加入时间修正。新型井下定位机制能对煤矿安全体系产生重要影响，具有较高的推广价值。

参考文献

[1] 张雨欣.地磁日变规律以及日变值计算方法研究[D].北京:中国地质大学(北京),2021

[2] 靳宇航,王海涌,刘涛,等.一种导弹捷联惯导/地磁/雷达高度表组合导航方法[J].导航与控制,2018,17(6):54-60

[3] 黄鹤,仇凯悦,李维,等.基于粒子滤波联合算法的地磁室内定位[J].西南交通大学学报,2019,54(3):604-610

[4] 黄军胜.基于重磁场的优化自主导航技术概述[J].地理空间信息,2020,18(2):31-33

[5] 孙建军.基于遗传算法的地磁匹配导航应用[J].地理空间信息,2017,15(6):26-27

[6] 李思民,蔡成林,王亚娜,等.基于地磁指纹和PDR融合的手机室内定位系统[J].传感技术学报,2018,31(1):36-42

[7] 余秋星.一种基于地磁强度特征的室内定位方法[J].中国新通信,2014,16(23):19-21

[8] 赵建虎,王胜平,王爱学.基于地磁共生矩阵的水下地磁导航适配区选择[J].武汉大学学报(信息科学版),2011,36(4):446-449

[9] 李兴康,付永涛,周章国,等.地磁日变不同时段特征差异及对地磁日变改正的影响[J].物探与化探,2023,47(1):135-145

[10] 高姗,王文博,崔志伟,等.基于地磁坐标的多地磁台站日变改正方法[J].物探与化探,2022,46(6):1 518-1 522

[11] 薛淑杰.紧急避险系统在某矿井的建设及应用[J].矿业装备,2022(1):248-249

[12] 王子龙.简单磁测方法在强磁性矿山地质工作中的应用[J].科学技术创新,2019(23):52-53

[13] 汪金花,郭云飞,张博,等.井下小区域地磁数值的时域变化与波动分析[J].云南大学学报(自然科学版),2018,40(3):483-490

[14] 范锡睿.基于地磁主导的移动室内定位系统[D].上海:上海交通大学,2018

[15] 蔡成林,曹振强,张炘,等.室内地磁基准图构建的优化算法研究[J].大地测量与地球动力学,2017,37(6):647-650

[16] 刘元成.基于PDR与地磁匹配融合的室内定位算法研究[D].桂林:桂林电子科技大学,2021

[17] 张恒嘉,汪金花,刘暑明,等.小区域地磁匹配算法研究[J].华北理工大学学报(自然科学版),2021,43(2):30-35

[18] 汪金花,张博,郭立稳,等.井下巷道地磁匹配特征的CEA卷积增强的分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(9):1 422-1 431

[19] 刘庆雅.基于改进粒子群的地磁匹配算法研究[D].南京:东南大学,2020

[20] 刘元成,蔡成林,韦照川,等.基于PDR和地磁匹配融合的楼层定位方法[J].传感技术学报,2020,33(4):557-563

[21] 余志超.基于多特征量的地磁匹配算法及应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019

[22] 汪金花,李卫强,陈晓停,等.井下GRPM定位研究与地磁匹配的仿真试验[J].煤炭学报,2018,43(增刊1):338-343

(上接第77页)

[14] Zhu Z, Woodcock C E. Object-based Cloud and Cloud Shadow Detection in Landsat Imagery[J]. Remote Sensing of Environment,2012,118(3):83-94

[15] McFeeters S K. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996,17(7):1 425-1 432

[16] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS[M]. NASA Special Publication,1974:1-9

[17] 韩冰冰,陈圣波,曾庆鸿,等.基于J-M距离的多时相Sentinel-1农作物分类[J].科学技术与工程,2020,20(17):6977-6982

[18] Bhattacharyya A. On a Measure of Divergence Between Two Statistical Populations Defined by Their Probability Distribution[J]. Bulletin of the Calcutta Mathematical Society,1943,35:99-110

[19] 戚玉娇,李凤日.基于KNN方法的大兴安岭地区森林地上碳储量遥感估算[J].林业科学,2015,51(5):46-55

[20] 张锦水,何春阳,潘耀忠,等.基于SVM的多源信息复合的高空间分辨率遥感数据分类研究[J].遥感学报,2006,10(1):49-57

[21] 刘毅,杜培军,郑辉,等.基于随机森林的国产小卫星遥感影像分类研究[J].测绘科学,2012,37(4):194-196

[22] 吴琳琳,李晓燕,毛德华,等.基于遥感和多源地理数据的城市土地利用分类[J].自然资源遥感,2022,34(1):127-134

[23] 陈成,卢刚,石晓峰.基于SVM的资源三号测绘卫星影像分类[J].地理空间信息,2013,11(3):11-13

[24] 梁瀚月.基于Sentinel-1数据的江西省南昌县早稻信息提取研究[D].成都:成都理工大学,2017