

文章编号: 1671-7449(2026)02-0161-11

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(2): 161-171.

用于地磁定位的道路地磁图更新方法

狄广义*, 杨世军, 高磊, 陈见飞, 郑显民, 代海洋

(国能数智科技开发(北京)有限公司, 北京 100096)

摘要: 在工业场景中应用地磁定位技术, 需要提前获取定位场景内的磁感应强度并建立高精度地磁图, 但是定位区域的磁感应强度会随着现场区域的环境改变而变化, 影响地磁定位精度。虽然定期进行地磁图的测量采集可以很好地解决这个问题, 但是这种方式实时性差、成本高。为了解决地磁定位在应用过程中地磁图实时更新难的问题, 提出了一种用于地磁定位的道路地磁图更新方法。通过分析实时图和基准图的相似度, 当它们存在较大差异时, 利用实时定位所获取的数据对由于环境变化导致的地磁图变化进行在线实时更新。经某电厂实测数据验证, 更新后有效提升了定位可靠性, 为解决地磁定位技术在使用过程中由于环境变化带来的地磁图更新维护问题提供了一条简便有效的技术途径。

关键词: 地磁定位; 道路地磁图; 地磁图更新; 地磁图维护

中图分类号: TM769

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026004

引用格式: 狄广义, 杨世军, 高磊, 等. 用于地磁定位的道路地磁图更新方法[J]. 测试技术学报, 2026, 40(2): 161-171.

DI Guangyi, YANG Shijun, GAO Lei, et al. Updating method of road geomagnetic map for geomagnetic positioning[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(2): 161-171.

Updating Method of Road Geomagnetic Map for Geomagnetic Positioning

DI Guangyi*, YANG Shijun, GAO Lei, CHEN Jianfei, ZHENG Xianmin, DAI Haiyang

(China Energy Digital Inteltech Development Co., Ltd., Beijing 100096, China)

Abstract: In industrial applications of geomagnetic positioning technology, it is necessary to pre-acquire the magnetic induction intensity within the positioning area and establish a high-precision geomagnetic map. However, the magnetic induction intensity in the positioning zone may fluctuate due to environmental changes at the operational site, which can degrade geomagnetic positioning accuracy. While regular measurement and collection of geomagnetic maps can mitigate this issue, such methods are constrained by poor real-time performance and high costs. To address the challenge of real-time geomagnetic map updates during practical applications, a road geomagnetic map updating method proposed for geomagnetic positioning. By analyzing the similarity between real-time maps and baseline maps, online real-time updates to the geomagnetic map is performed the method by using data acquired during real-time positioning when significant discrepancies between the two maps arise due to environmental changes. The positioning reliability validated by field data from a power plant is significantly enhanced by this updated method, a simple yet effective technical solution is achieved for the maintenance and updating of geomagnetic maps

【收稿日期】2025-02-19

*【通信作者】狄广义(1983—), 男, 工程师, 主要从事信息管理、智能制造、人员定位系统研究。E-mail: 79357911@qq.com。

impacted by environmental changes during the deployment of geomagnetic positioning technology.

Key words: geomagnetic positioning; road geomagnetic map; geomagnetic map update; geomagnetic

0 引言

定位是位置服务、万物互联、人工智能和未来超智能(机器人+人类)应用的核心技术之一。柳景斌等^[1]针对高精度室内定位技术的最新发展现状,介绍了各类方法的定位原理,分析了当前技术发展,指出地磁定位作为一种室内定位技术不受时间和障碍物遮挡的影响。张宁等^[2]提出在设计室内空间定位解决方案时,需要考虑定位精度、覆盖范围、系统可靠性、定位成本、系统功耗、系统可扩展性和响应时间等,地磁定位具有不需要铺设任何硬件,成本低,定位精度较高,在独立使用时,平均定位精度优于1 m等优势^[3],特别适用于金属构造、环境复杂的场景,在电力、化工、煤矿等行业定位服务中得到广泛应用^[4-5]。

2007年,晏登洋^[6]和蔡兆云等^[7]提出地磁定位在水下和航空中与惯导进行组合,应用于卫星拒止情况下的导航定位。周军等^[8]和胡小平^[9]详细分析了航空和水下地磁定位技术的基本原理和关键技术。Chen等^[10]通过多分量地磁信息联合定位与决策机制,提高了地磁定位在近空间的适用性。这些研究成果为地磁定位在室内应用提供了参考。

地球磁场、人工建筑和室内铁磁性设备产生的磁场,统称为环境固有磁场。这部分环境固有磁场随时间变化较为稳定,其强度(大小)和方向随空间位置的变化而变化,为位置信息的测量提供了一个天然坐标系。由于地球磁场占环境磁场的95%以上,本文为了方便描述,用地磁场代指上述的环境固有磁场。

地磁场随空间位置不同呈现明显的差异性,可利用地磁场随位置变化的特性实现定位。其基本原理是:事先对定位场景的地磁场信息进行测量,制成与空间相关的地磁图^[11];定位时,把带有磁传感器的定位终端佩戴在需要定位的人员身上或者安装在需要定位的车辆上,定位终端里的磁传感器随着人员行进和车辆行驶不断测量路线上的地磁场数据,终端内的处理器将实际测量的地磁场数据与预先测绘采集得到的地磁图进行比对,在磁场图内找到和测量磁场数据最相似的磁场数据所在位置,即认为是人员或车辆的所在位置^[12]。所以,由地磁定位原

理可知,地磁定位的关键技术是地磁图的采集、磁传感器的误差校正^[13]以及用于地磁定位的稳定磁场特征提取和地磁定位算法^[14]。

动态时间规整算法(Dynamic Time Warping, DTW)可用于地磁定位中稳定磁场特征的提取,解决了不同采集速度下的地磁序列匹配问题。陶强^[15]设计并实现了一个基于安卓平台的地磁定位室内导航系统,利用安卓手机的地磁传感器实现定位,并为用户提供到指定地点的导航服务。邬锦彬^[16]采用基于DTW的地磁指纹匹配算法实现定位,并采用最短路径算法进行路径规划完成导航。金展等^[17]采用改进的DTW算法进行地磁序列匹配,提高了大型数据库的动态定位效率;后续采用粒子滤波算法融合地磁序列定位和行人航位推算(Pedestrian Dead Rockoning, PDR)的结果,在智能移动终端载体上实现了快速精准定位,平均定位精度在1.4 m以内。为了提高地磁定位的效率,王一帆^[18]提出了一种改进的DTW地磁定位方法,每次定位时,提前剔除不可能最优的匹配序列,在保证定位精度的同时,时耗降低了23%~72%。

此外,可将机器学习等算法用于地磁定位的特征识别过程,以提高地磁特征识别的准确性。邵文华^[19]提出的基于卷积神经网络的检测算法提高了识别准确率,能够以较低计算开销实现80%概率1 m的定位精度。孙垚棋等^[20]提出了一种使用深度神经网络来提高定位精度的地磁室内定位系统,通过引入时间卷积网络来提取地磁轨迹序列的深层特征,将定位精度最少提高了0.3 m。裴科^[21]提出基于注意力机制的卷积网络-门控循环单元(Convolutional Neural Networks-Gated Recurrent Unit, CNN-GRU)地磁序列定位算法,分别提取地磁序列指纹的空间特征和时间特征,并通过注意力机制对GRU网络的各个时刻输出赋予不同的权重,相较于现有定位算法有明显提升,最高定位精度可达0.14 m。

但是,面向工程应用,鲜有研究探讨由于环境变化导致地磁图差异带来的匹配不准问题。地磁定位在实际应用过程中,定位区域的磁感应强度会随着现场区域的环境改变而变化,比如现场环境中增添了大型的金属设备,工地、隧道不断往前开挖和掘进,室内进行了布局改造和大面积的装修等。当

定位系统不知磁感应强度何时发生变化以及变化量时,仍然用已经存在偏差的地磁图进行匹配参考,将会引入较大的定位误差。所以,当定位区域设备和布局发生较大变化需要更新时,最简单的方法是重新测量现场环境的磁场分布以确保地磁定位的准确性,但大大影响了地磁定位技术应用的便利性。

鉴于以上分析,本文提出了一种地磁图在线更新方法,可自动对由于环境变化引起的地磁图变化进行在线实时更新,无需人工维护,对提高地磁定位技术应用的便利性具有实际意义。

1 道路地磁图在线更新基础

地磁定位技术的理论基础是地球磁场、人工建筑和室内铁磁性设备产生的感应磁场随时间稳定,随空间具有显著变化。对于室内场景,一般磁场空间变化的分辨率可以达到0.1 m,为室内实现1 m级的定位精度提供了可能。图1给出了一个室内需要定位区域的磁场分布情况,不同颜色代表不同的磁场大小。磁图以外部分是非定位区域,是指墙壁或者放置了大型室内设备导致人无法穿行的区域。

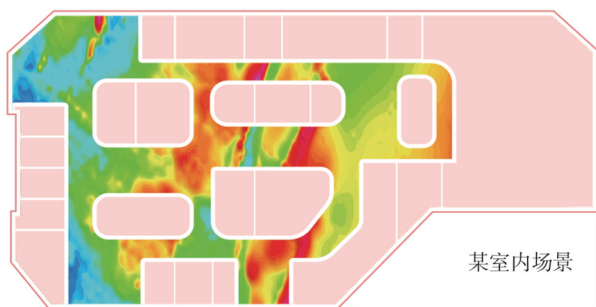


图1 某室内场景的地磁图(20 m×40 m)

Fig. 1 Geomagnetic map of an indoor scene(20 m×40 m)

道路地磁图在线更新的基础是已经完成了定位区域道路磁场的测量并生成地磁图。例如,对于化工厂、电厂、商业地产内建筑等这类基本稳定的场景,已经完成定位区域的磁场测量并生成地磁图,具备定位能力;对于正在施工的隧道或者不断开采挖掘的煤矿等场景,已经完成稳定区域的磁场集中采集,获得了已知区域的地磁图,可利用本文介绍方法不断补充完善施工面磁场。

为了确保原始地磁图精度,地磁图集中测量和制作阶段需要注意以下3个方面:位置测量准确度、磁场测量准确度及精确的地磁图数据处理方法。

本文采用基于激光雷达的专业地磁测量装置进行地磁场数据采集,装置如图2所示。磁图测

量装置由无磁小车、激光雷达、磁传感器、工控板等组成。无磁小车是磁图测量装置的载体,所有设备都安装在无磁小车上,由人推着小车在测量场地内行走,实现位置和磁场数据的同步采集。以车作为载体,可以很好地避免将人为操作习惯差异导致的测量误差引入到采集过程中。激光雷达通过即时定位与地图构建(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)技术实现室内地图以及位置信息的测量,定位精度优于0.1 m;磁传感器用于测量磁场信息;磁场数据、激光雷达数据在工控板内进行同步和存储。



图2 磁图测量装置

Fig. 2 Geomagnetic map measuring device

以电厂为例,图3为电厂磁场采集的现场图,图4为该激光雷达记录的采集路线,图4的底图是激光雷达生成的平面点云图。通过采图装置可获得采集路线上的地磁场数据,利用双线性插值方法将原始磁场数据网格化,得到每个网格点上的磁场大小,如图5和图6所示。设定的网格点间距与室内磁场特征的分布特性相关,当室内磁场特征越丰富时,所需的网格点间距越密,一般情况下,网格点间距在0.1~1 m之间。



图3 地磁图采集

Fig. 3 Geomagnetic map acquisition

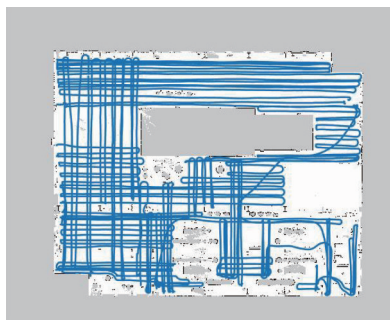


图4 地磁图采集路线

Fig. 4 Geomagnetic map acquisition route

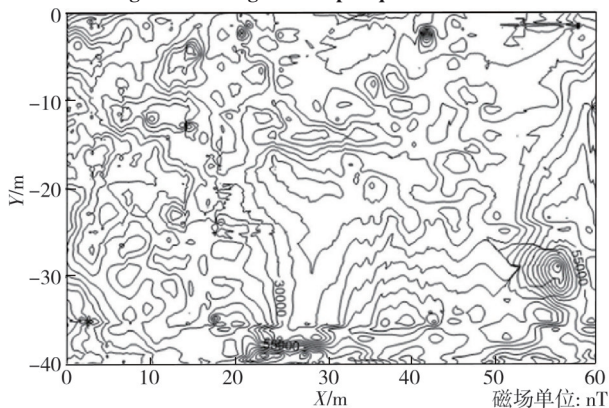


图5 网格化后的地磁场等值线分布图

Fig. 5 Contour distribution map of gridded geomagnetic field

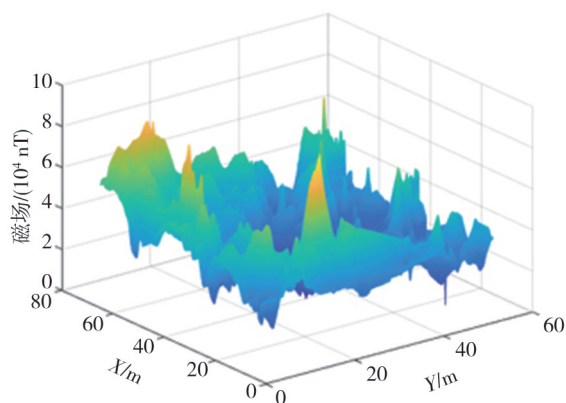


图6 网格化的磁场三维剖面图

Fig. 6 Three-dimensional sectional view of gridded geomagnetic field

激光雷达建立的是平面直角相对坐标系,为了将地磁定位与室外定位进行融合,可将激光雷达建立的坐标系转换到cgcs2000或其他地理坐标系下,得到地理坐标系下的地磁图。地磁图存储的数据内容有 (Lat, Lon, B) , Lat 和 Lon 为cgcs2000坐标系下的纬度和经度; B 为该位置的地磁场感应强度。

实时定位时,定位终端佩戴在人身上,内含的磁传感器模块和惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)不断采集测量地磁场、角速率和加速度数据,并根据IMU测量结果,将地磁场数据与PDR结果进行对齐后,与事先制作的地磁图(见图6)数

据进行比对。在图6内找到和测量磁场数据最相似的磁场数据所在位置,即认为是当前位置。

上述地磁定位系统上线运行后,作业场景内局部增添或减少设备的情况不可避免,虽然不会引起地磁场整体结构和布局特征的变化,但影响设备周围磁场的局部变化,进而影响定位结果。此时,可利用本文道路地磁图更新方法,采用实时定位测量积累的磁场数据,判断是否满足更新条件,在满足更新条件时,对图6的地磁图进行局部更新处理,解决由于环境变化引起的地磁图更新问题和由于工作场景一直推进下新场景地磁图的补充构建问题。

需要注意的是,无论是旧场景局部更新磁图还是新场景小范围构建磁图,都需要位置坐标数据。位置坐标由IMU的PDR结果提供,如果大部分区域没有磁场数据,PDR不能保证精度的情况下,本文方法不再适用,这种情况需要人工专门采集以确保位置测量精度。

2 道路地磁图更新流程

本方法中涉及到的变量定义如下:

两个坐标系:地理坐标系(导航坐标系) $OX_tY_tZ_t$:北东地坐标系;载体坐标系 $OX_bY_bZ_b$:前右下坐标系。

俯仰角 θ :绕 OY_t 旋转, OX_b 轴与水平面的夹角,向上为正,角度范围为 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 。

横滚角 γ :绕 OX_t 旋转, X_bOZ_b 平面与铅垂面的夹角,顺时针正,角度范围为 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 。

航向角 ψ :绕 OZ_t 旋转, OX_b 在水平面的投影与地理北极的夹角,向西为正,角度范围为 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 。

导航坐标系下加速度: $A_t = \begin{bmatrix} A_{xt} \\ A_{yt} \\ A_{zt} \end{bmatrix}$, A_{xt} 、 A_{yt} 、 A_{zt}

分别代表 OX_t 、 OY_t 、 OZ_t 3个方向的加速度大小。

地磁场感应强度 B :地磁场总场强度的大小。

$\{B_{t1}, B_{t2}, \dots, B_{tn}\}$, $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$, $\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n\}$, $\{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n\}$, $\{A_{xt1}, A_{xt2}, \dots, A_{xtn}\}$, $\{A_{yt1}, A_{yt2}, \dots, A_{ytn}\}$, $\{A_{zt1}, A_{zt2}, \dots, A_{ztn}\}$ 表示这段路线采集的导航坐标系下 n 个磁感应强度序列、姿态角度数据序列和 n 个加速度数据序列; $\{SF_1, SF_2, \dots, SF_n\}$ 表示这段路线中经PDR模块得到的采集人员的步频信息。

道路地磁图在线更新的处理流程如图7所示。

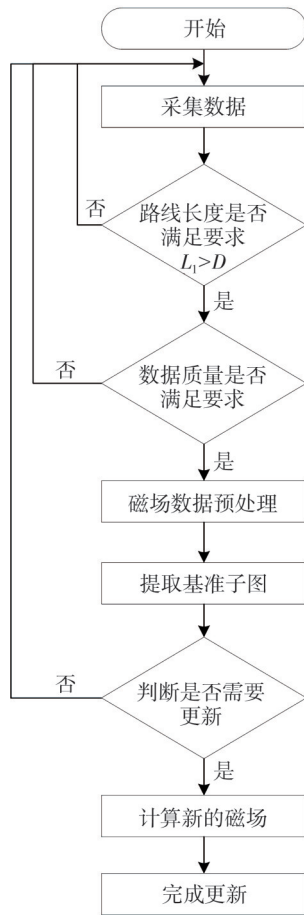


图 7 地磁图更新流程

Fig. 7 Geomagnetic map update process

下面对图 7 所描述的流程分步进行详细阐述和介绍。

2.1 数据质量评估方法

当行人(车辆)累积行走(行驶)了一条距离 $L1(L1 > D)$ 的路线之后,对这段路线的数据质量进行评估,如果满足条件,则进行下一步,否则重复第一步。 D 为设置的道路长度阈值,道路长度不能过长或者过短,过长的直线道路室内满足条件的少,过短道路上磁场没有差异,都不具备更新意义。根据上述原则,室内工业场景道路阈值设置为 10~15 m 比较合理。数据质量评估方法如下:

第一步:数据平稳程度评估。数据平稳程度评估的目的是确保这一段用于更新的磁场序列 PDR 结果稳定可靠,由 PDR 推算的位置坐标准确。路线航向变化不能超过 5° ,俯仰和滚转角度变化不超过 10° ;对于人员定位,经 PDR 得到的行进中的步频极差不超过 0.2;对于车辆定位,其前进方向的线加速度均值不大于 0.01 m/s^2 ,加速度

标准差不大于 0.02 m/s^2 ,以保证用于更新的这段磁场数据采集状态是平稳、直线而且匀速的。上述特征值阈值选择范围根据大量的室内行走数据,结合经验和数据统计得出,能够满足平稳、直线并且匀速的基本要求。

第二步:磁场数据质量评估。磁场数据质量评估的目的是通过选择磁场数据质量高的磁场序列,确保当前的变化是由于磁基准图的变化引起,而非磁场测量不准确引起。磁场数据质量评估包含两个步骤:1)将行进中采集的磁场进行高通滤波,截止频率可设定为 3 Hz,并评估高通得到数据的均方根(Root Mean Square, RMS),若 RMS 大于 200 nT,则可认为数据噪声偏大,不能用于地磁图的更新;2)这段磁场数据存在明显的台阶类变化或基本没有变化,如果存在上述情况,说明磁场存在未知干扰以及磁场特征较弱,位置没有发生变化等现象,不适合更新。磁场数据质量评估阈值是根据室内磁场数据进行大量统计分析得出的经验数值。

对数据质量评估步骤进行总结,各特征需满足式(1)。

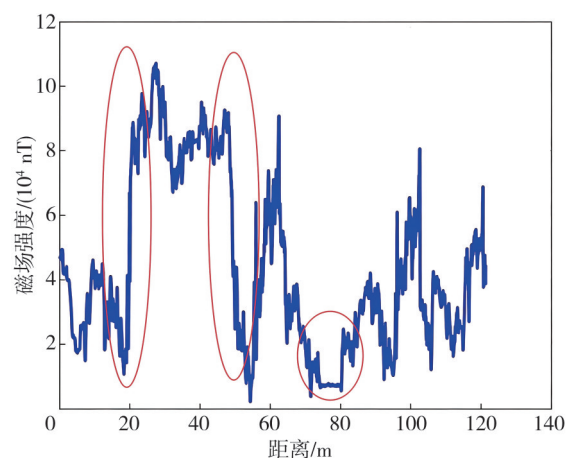
$$\begin{cases} |\theta_{\max} - \theta_{\min}| < 10^\circ, \\ |\gamma_{\max} - \gamma_{\min}| < 10^\circ, \\ |\phi_{\max} - \phi_{\min}| < 5^\circ, \\ |SF_{\max} - SF_{\min}| < 0.2 \text{ 或 } \text{mean}(A_i) < 0.01 \text{ m/s}^2, \\ \text{RMS}(Hp(B_r)) < 200 \text{ nT}, \\ \max(|B_{ri} - B_{r(i-1)}|) < 1000 \text{ nT}, \\ 200 \text{ nT} < \text{std}(B_r) < 20000 \text{ nT}. \end{cases} \quad (1)$$

下面给出一段具体的质量评估示例。以电厂主厂房内一段磁场数据为例,图 8 和图 9 分别为不满足要求和满足要求的磁场数据情况。

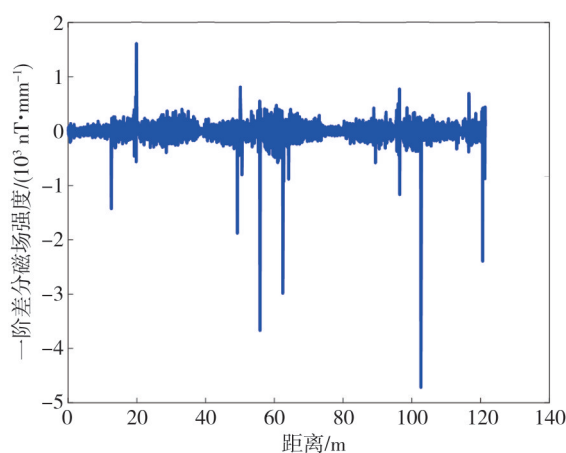
图 8(a) 中两处圈出来的磁场数据存在明显台阶类变化,一处圈出来的磁场数据基本没有变化。通过计算磁场数据的一阶差分、磁场标准差对异常情况进行判断和筛选,如图 8(b) 和 (c) 所示。

两处台阶变化对应的磁场一阶差分大于 1000 nT/mm ,标准差也大于 20000 nT ;磁场不变位置处的标准差小于 200 nT ,不满足式(1)所述条件,磁场数据质量较差,不能用于更新。

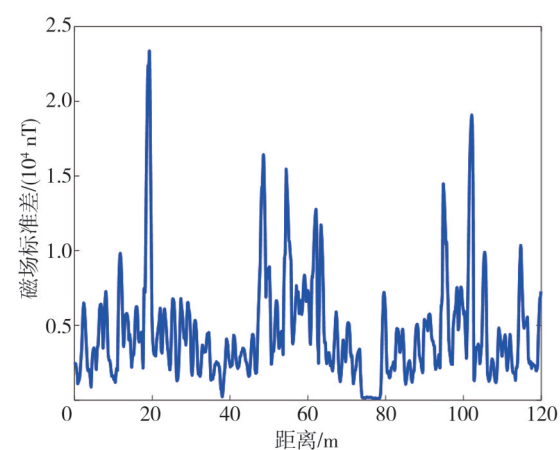
图 9 所述磁场数据没有明显异常,一阶差分全部小于 1000 nT/mm ,标准差大于 200 nT 、小于 18000 nT ,在式(1)所给的范围内。



(a) 总场强度图



(b) 总场一阶差分图

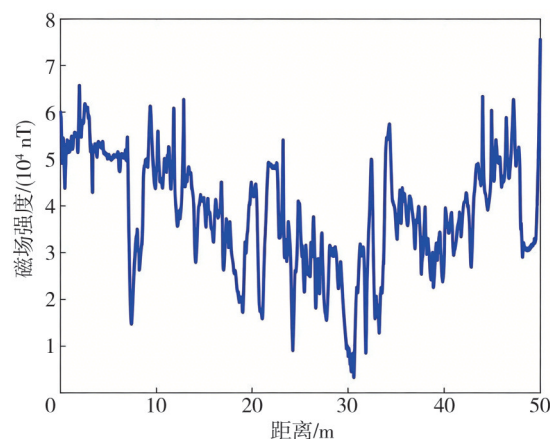


(c) 总场标准差图

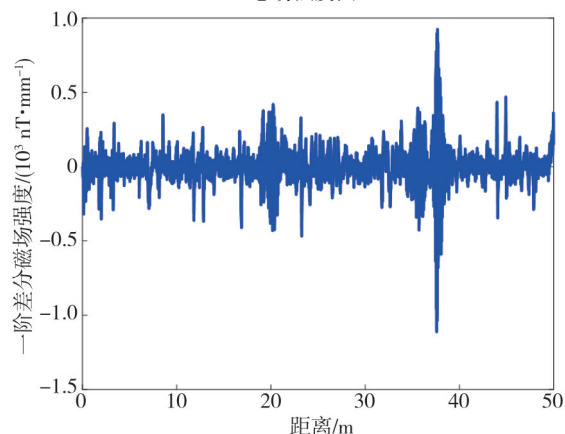
图 8 磁场数据质量评估(不满足要求)

Fig. 8 Quality assessment of magnetic field data (not meeting requirements)

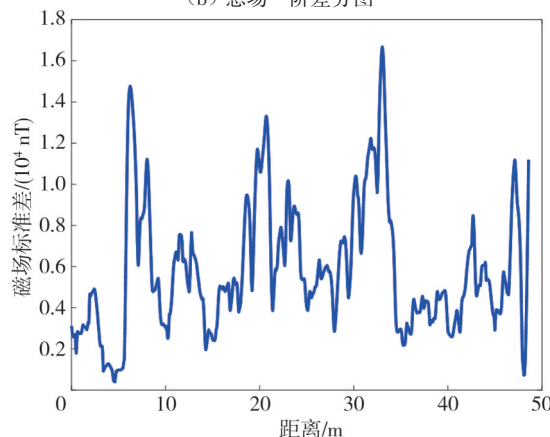
从图 9(a) 中也能看出磁场数据连续, 与图 8(a) 相比, 没有跳变数据点, 符合室内磁场变化特性, 测量数据质量较好, 满足地磁图更新的数据质量要求。



(a) 总场强度图



(b) 总场一阶差分图



(c) 总场标准差图

图 9 磁场数据质量评估(满足要求)

Fig. 9 Quality assessment of magnetic field data (meeting requirements)

2.2 测量数据预处理方法

虽然经过 2.1 节已经把数据质量不满足要求的测量数据进行了筛选, 但测量数据仍然存在高频干扰、跳变、小的台阶等异常信号, 所以还需要对评估后满足质量要求的磁场数据进行数据预处理, 去掉磁场变化异常点, 提高测量信噪比, 按照道路地磁图网格间距对实时磁场序列进行规格化, 得到可用于更新的磁场序列。

第一步: 对采集到的磁场数据进行中值滤波, 中值滤波窗口一般设置为 1~2 s 的采样点数, 经过中值滤波, 能够有效消除电气设备产生的高频干扰, 保留电气设备开关产生的台阶信号以及环境特征信号。

第二步: 对滤波后的数据进行一阶差分, 通过设置相关的阈值对台阶类异常进行检测, 当高于该阈值时, 可认为是台阶信号(依据经验, 阈值设置为最近 1 s 内测量数据一阶差分的均值+3 倍标准差); 对检测得到的值用 1 s 内测量数据一阶差分的均值代替, 完成地磁场数据的滤波处理。

第三步: 按照基准图网格间距对这段磁场数据进行网格规划(0.1~1 m), 处理后的磁场数据为 $B_{re} = \{B_{re1}, B_{re2}, \dots, B_{ren}\}$ 。

2.3 地磁图更新处理方法

对地磁场数据预处理进一步提高磁场数据信噪比后, 即可开始对原始基准图进行更新处理。

根据实时磁场序列所在的位置, 从地磁图数据库中, 找出相同位置的磁场数据, 并把其提取出来作为待更新磁场序列。对于地磁图中没有该位置处磁场的增量构图情况, 直接用新测磁场 $B_{re} = \{B_{re1}, B_{re2}, \dots, B_{ren}\}$ 代入, 得到这段序列磁场的初值 $B_{rf} = \{B_{rf1}, B_{rf2}, \dots, B_{rfn}\}$, 并跳过第一步和第二步, 直接进入第三步。

第一步: 在 $B_{re} = \{B_{re1}, B_{re2}, \dots, B_{ren}\}$ 中以 $L2$ (5~8 m) 为子路线的长度, d (0.2~0.5 m) 为间距, 遍历整个路线。

第二步: 在 $B_{rf} = \{B_{rf1}, B_{rf2}, \dots, B_{rfn}\}$ 中以实时定位给出的位置为中心, $(-D \sim +D)$ ($D=1 \sim 2$ m) 为搜索范围, d (0.2~0.5 m) 为间隔, 取 $\left(\frac{2D}{d} + 1\right)$ 个相同长度($L2$)的基准图子路线做相关, 如式(2)所示。把最大值 $R_{\max}$ 作为新测子序列与基准子序列的相关值, 如果该相关值小于 0.7, 则认为需要对基准图子序列进行更新, 这段需要更新的基准磁场记为 $B_{rfi} = \{B_{rfi1}, B_{rfi2}, \dots, B_{rfim}, B_{rfi(m+1)}\}$, 新测磁场记为 $B_{ret} = \{B_{ret1}, B_{ret2}, \dots, B_{retm}\}$, 基准磁场序列个数为 $m+1$, 新测磁场序列个数为 m 。

$$R_{\max} = \max \left(\frac{\sum_{i=1}^n (B_{rei} - \overline{B_{re}})(B_{rfji} - \overline{B_{rfj}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (B_{rei} - \overline{B_{re}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (B_{rfji} - \overline{B_{rfj}})^2}} \right),$$

$$(j=1, 2, \dots, \frac{2D}{d} + 1). \quad (2)$$

第三步: 计算新的磁场值。

待更新的基准磁场计算公式为

$$B_{rfi}^1 = B_{reti} + B_{rfi1} - B_{ret1} \quad (i=1, 2, \dots, m). \quad (3)$$

对 B_{rfi}^1 进行平差处理,

$$B_{rfi}^2 = B_{rfi}^1 + i * (B_{rfi(m+1)} - B_{rfim}^1) / (m-1), \quad (4)$$

$$(i=1, 2, \dots, m).$$

第四步: 完成更新。在基准图数据库中找到这条路线前 $L2/2$ 和后 $L2/2$ 的磁场数据, 和 B_{rfi}^2 一起组成一段新的长 $L2$ 的磁场数据序列 B_{rfi}^3 ($i=1, 2, \dots, 2n-1$)。

对 B_{rfi}^3 更新后进行均值滤波。在基准磁场 B_{rf} 中, 用 B_{rfi}^4 替换相同位置的磁场完成磁场数据的更新。

$$B_{rfi}^4 = \frac{B_{rfi(i-1)}^3 + B_{rfi}^3 + B_{rfi(i+1)}^3}{3},$$

$$(i=2, 3, \dots, 2n-1). \quad (5)$$

3 道路地磁图更新验证

利用在电厂实测的一段数据对本文所述方法进行更新验证。图 10 为项目运行过程中定位时所测的一条长 50 m 道路的磁场数据, 图 11 为测量时的姿态数据, 图 12 为测量时的步频数据。基于式(1)的计算结果, 如式(6)所示, 满足用于更新的姿态数据测量条件。

$$\begin{cases} |\theta_{\max} - \theta_{\min}| = 4.8^\circ, \\ |\gamma_{\max} - \gamma_{\min}| = 5.4^\circ, \\ |\phi_{\max} - \phi_{\min}| = 4.5^\circ, \\ |SF_{\max} - SF_{\min}| = 0.06. \end{cases} \quad (6)$$

磁场特征计算结果如图 13~图 15 所示。

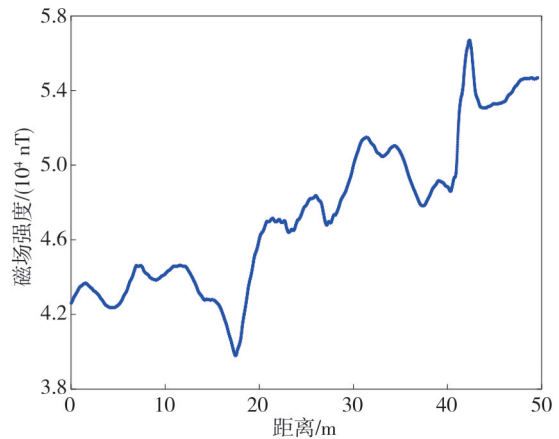


图 10 实时磁场

Fig. 10 Real-time geomagnetic field

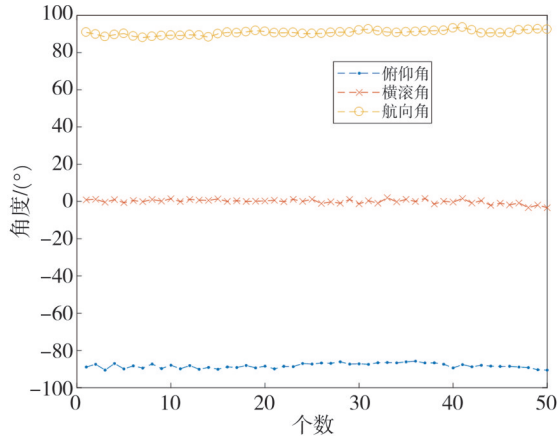


图 11 姿态数据
Fig. 11 Attitude data

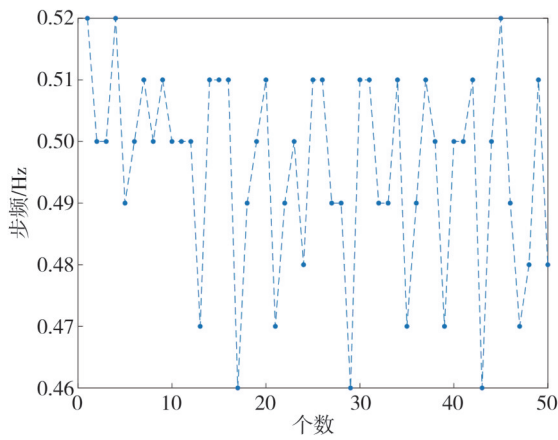


图 12 步频数据
Fig. 12 Stride frequency data

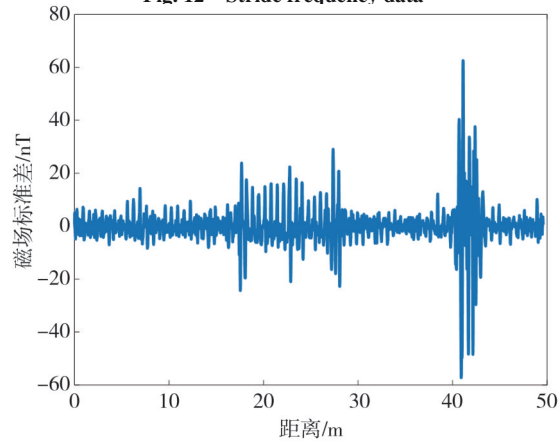


图 13 高通滤波后的磁场数据
Fig. 13 Geomagnetic field data after high-pass filtering

图 13 为高通后的磁场数据,图 14 为磁场一阶差分数据,图 15 为磁场的标准差数据。基于式(1)的计算结果,如式(7)所示,说明磁场数据测量质量满足更新要求。

$$\begin{cases} RMS(Hp(B_r)) = 7 \text{ nT}, \\ \max(|B_{re} - B_{re(i-1)}|) = 135 \text{ nT}, \\ \max(std(B_{re})) = 2734 \text{ nT}, \\ \min(std(B_{re})) = 669 \text{ nT}. \end{cases} \quad (7)$$

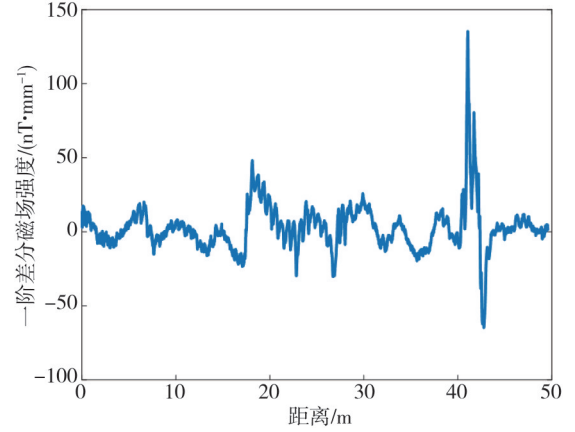


图 14 磁场一阶差分数据

Fig. 14 First-order difference of geomagnetic field

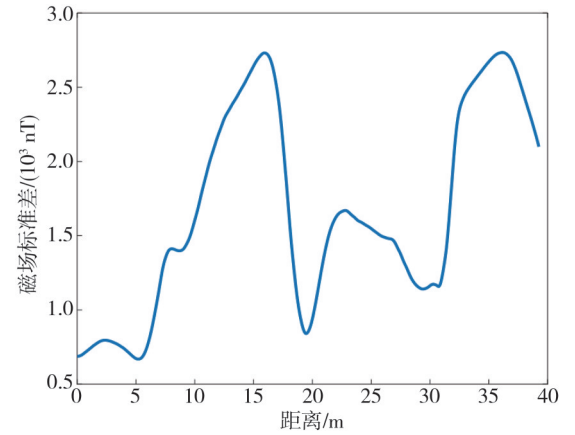


图 15 磁场标准差数据

Fig. 15 Standard deviation of geomagnetic field

下面分析该条道路磁场数据与基准磁场数据的相似程度,判断其是否需要更新。图 16 为该路线磁场(2024 年 3 月 12 日测)与基准磁场(2024 年 1 月 27 日测)的对比,从图中可以看出由于环境的变化,局部磁场发生了改变,导致图中标识的两段数据差异较大。按照 2.3 节式(2)方法,对其相关值进行计算,如图 17 所示,其中两段数据的相关值小于 0.7,需要更新。

根据式(2)第一步更新后的基准磁场,如图 18 所圈位置可以看出,由于基准磁场和实时磁场强度的差异,直接更新存在明显的台阶效应。

按照式(3)~(5)对更新数据进行平差处理,如图 19 所示,可以看出,平差处理很好地消除了由于磁场强度差异带来的台阶异常变化,更准确地描述了地磁场特征。

绘制更新前的基准磁场和根据当前测量数据对基准图更新后的基准磁场,如图 20 所示。从图中可以看出,更新后的基准磁场更符合当前磁场特征。更新前后的相关值变化如图 21 所示,相关值全部大于 0.7,更新效果明显。

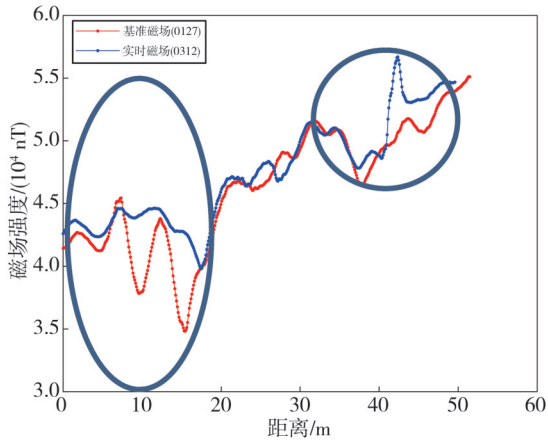


图 16 磁场发生变化前后的磁场分布

Fig. 16 Geomagnetic field distribution between different time

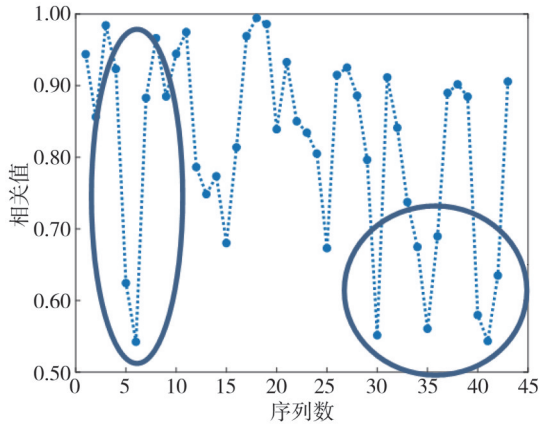


图 17 相关值

Fig. 17 Correlation value

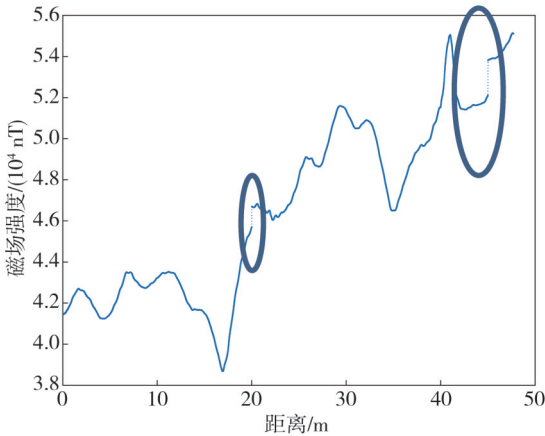


图 18 更新处理后的磁场

Fig. 18 Updated magnetic field

利用上述方法,分别在电厂、选煤厂以及化工厂进行了地磁定位测试,定位结果如表 1 所示。表中配准概率是指测试中,定位误差小于 1 m 的测试点占有所有测试点的比例。定位精度是所有定位误差的均方根误差,如式(8)所示。

$$\epsilon_i = \sqrt{\epsilon_{xi}^2 + \epsilon_{yi}^2}, \quad \epsilon_{\text{RMS}} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

式中: i 为测试点数, $i=1, 2, \dots, n$; $\epsilon_{xi}, \epsilon_{yi}$ 为第 i 个点 x 方向和 y 方向的定位误差。

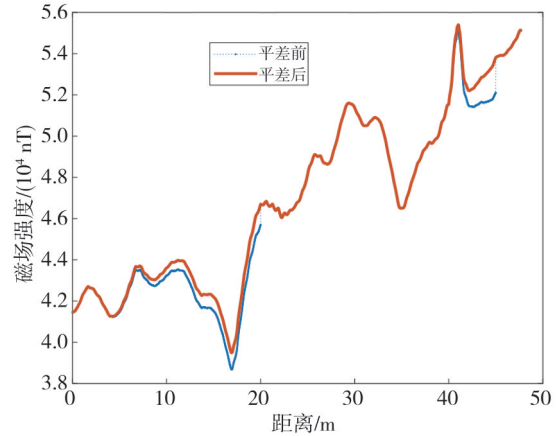


图 19 平差处理后的基准磁场

Fig. 19 Geomagnetic field after adjustment processing

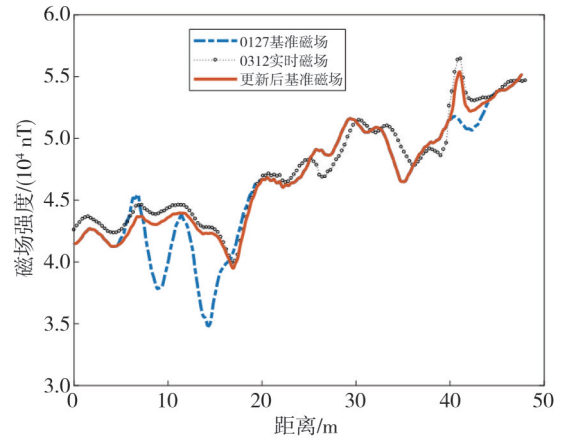


图 20 最终结果

Fig. 20 Final result

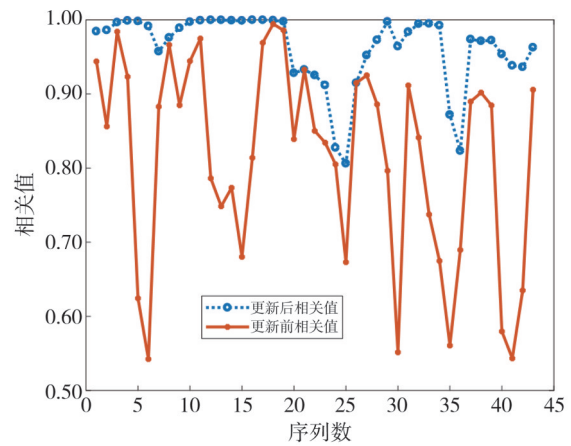


图 21 更新处理前后的相关值变化

Fig. 21 Change of correlation value before and after update processing

从表 1 中可以看出,对地磁数据库更新后,提升了地磁定位效果,验证了地磁图更新方法的有效性。

表 1 基准图更新前后定位效果对比

Tab. 1 Comparison of positioning results before and after the update of the reference map

	某电厂		某选煤厂		某化工厂	
	基准图更新前	基准图更新后	基准图更新前	基准图更新后	基准图更新前	基准图更新后
配准概率/%	94.7	98.7	93.1	97.5	92.4	96.9
定位精度/m	0.6	0.5	0.7	0.5	0.8	0.7

4 结 论

为满足工业领域地磁定位技术的应用需求，本文设计了一种室内道路地磁图更新方法，基于在后续定位时采集的磁场数据实现对原有地磁图的在线更新，确保地磁图的准确性，而不用定期专门派人再次采集维护。

对于正在施工的隧道或者不断开采挖掘的煤矿等，事先如果已经完成稳定区域的磁场集中测量，获得了已知区域的地磁图，也可基于工人在未知区域测量的磁场数据，对原有的地磁图不断进行增量构图，解决工作面推进情况下，地磁图的不断补充和完善。

该方法也可以应用在地面道路机动车的地磁定位导航中。基于车辆和人员在地磁定位时获取的磁场数据，对由于环境变化导致的地磁图变化进行在线实时更新，很好地解决了地磁定位技术在使用过程中地磁图维护的问题。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参 考 文 献

[1] 柳景斌, 赵智博, 胡宁松, 等. 室内高精度定位技术总结与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(7): 997-1008.
LIU Jingbin, ZHAO Zhibo, HU Ningsong, et al. Summary and prospect of indoor high-precision positioning technology[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(7): 997-1008. (in Chinese)

[2] 张宁, 付炜平, 孟荣, 等. 室内空间定位方法研究综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(3): 882-892.
ZHANG Ning, FU Weiping, MENG Rong, et al. Review on the indoor space positioning methods[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(3): 882-892. (in Chinese)

[3] 周家鹏, 汪云甲, 李昕, 等. 地磁室内定位技术研究

[J]. 测绘通报, 2019(1): 18-22.
ZHOU Jiapeng, WANG Yunjia, LI Xin, et al. Research on geomagnetic indoor positioning technology [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(1): 18-22. (in Chinese)

[4] 张立杰, 王刚刚, 申志飞, 等. 面向燃气电站的室内外判别及一体化多源融合人员定位方法[J]. 导航定位与授时, 2024, 11(4): 116-127.
ZHANG Lijie, WANG Ganggang, SHEN Zhifei, et al. Indoor and outdoor discrimination and integrated multi-source fusion personnel positioning method for gas-fired power stations [J]. Navigation Positioning and Timing, 2024, 11(4): 116-127. (in Chinese)

[5] 杨勇. 煤矿井下复杂环境地磁/Wi-Fi融合定位算法研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022.

[6] 晏登洋. 惯性/地磁组合导航技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.

[7] 蔡兆云, 魏海平, 任治新. 水下地磁导航技术研究综述[J]. 国防科技, 2007, 28(3): 28-29.
CAI Zhaoyun, WEI Haiping, REN Zhixin. Overview of underwater geomagnetic navigation technology [J]. National Defense Science & Technology, 2007, 28(3): 28-29. (in Chinese)

[8] 周军, 葛致磊, 施桂国, 等. 地磁导航发展与关键技术[J]. 宇航学报, 2008, 29(5): 1467-1472.
ZHOU Jun, GE Zhilei, SHI Guiguo, et al. Key technique and development for geomagnetic navigation [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(5): 1467-1472. (in Chinese)

[9] 胡小平. 水下地磁导航技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.

[10] CHEN C, LIANG L, ZENG Z, et al. Multi-geomagnetic-component assisted localization algorithm for hypersonic vehicles [J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2021, 22(5): 357-368.

[11] 孙建港. 基于地磁场信息的室内匹配定位技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.

[12] 陆一, 魏东岩, 纪新春, 等. 地磁定位方法综述[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(2): 118-130.
LU Yi, WEI Dongyan, JI Xinchun, et al. Review of geomagnetic positioning method [J]. Navigation Posi-

- tioning and Timing, 2022, 9 (2): 118-130. (in Chinese)
- [13] 朱学军, 潘孟春, 张琦, 等. 三轴磁强计输出误差的综合补偿方法[J]. 测试技术学报, 2014, 28(6): 526-531. ZHU Xuejun, PAN Mengchun, ZHANG Qi, et al. Comprehensive compensation method for the outputs of three-axis magnetometer [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2014, 28 (6): 526-531. (in Chinese)
- [14] HAVERINEN J, KEMPPAINEN A. Global indoor self-localization based on the ambient magnetic field [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2009, 57 (10): 1028-1035.
- [15] 陶强. 基于安卓平台的地磁定位室内导航系统的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [16] 郭锦彬. 基于地磁指纹的室内导航系统设计与实现 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- [17] 金展, 康瑞清, 王威. 基于地磁序列匹配的大型室内动态定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(7): 199-207.
- JIN Zhan, KANG Ruiqing, WANG Wei. Large indoor dynamic positioning method based on magnetic sequence matching [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(7): 199-207. (in Chinese)
- [18] 王一帆. 基于 Wi-Fi/地磁/PDR 的智能手机室内多源融合定位模型研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [19] 邵文华. 室内移动位置感知关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [20] 孙垚棋, 巩鹏博, 徐浙峰, 等. 基于地磁轨迹信号的新型室内定位[J]. 信号处理, 2021, 37(6): 952-957. SUN Yaoqi, GONG Pengbo, XU Zhefeng, et al. A novel indoor positioning based on geomagnetic trajectory signal[J]. Journal of Signal Processing, 2021, 37 (6): 952-957. (in Chinese)
- [21] 裴科. 基于深度学习的地磁室内定位算法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.