



### 地磁导航定位技术原理与方法综述

林沂, 孙晶京, 闫旭

### A review of the principles and methods of geomagnetic navigation and positioning technology

LIN Yi, SUN Jingjing, and YAN Xu

引用本文:

林沂, 孙晶京, 闫旭. 地磁导航定位技术原理与方法综述[J]. *全球定位系统*, 2023, 48(6): 32–41. DOI: [10.12265/j.gnss.2023134](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023134)

LIN Yi, SUN Jingjing, YAN Xu. A review of the principles and methods of geomagnetic navigation and positioning technology[J]. *Gnss World of China*, 2023, 48(6): 32–41. DOI: [10.12265/j.gnss.2023134](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023134)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023134>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 地磁暴对北斗用户伪距定位的影响分析

Analysis on the influence of geomagnetic storm of BDS pseudorange positioning

*全球定位系统*. 2019, 44(1): 82–88

#### 一种基于智能手机的室内地磁定位系统

An Indoor Geomagnetic Positioning System Based on Smartphone

*全球定位系统*. 2018, 43(5): 9–16

#### 应急物流领域导航定位技术研究

Navigation and Positioning Technology in Emergency Logistics

*全球定位系统*. 2017, 42(5): 80–84

#### 高精度室外定位确定室内初始点

High precision outdoor positioning to determine the indoor initial point

*全球定位系统*. 2020, 45(4): 72–75

#### 地基导航系统高性能快速定位算法

High Performance and Fast Positioning Algorithm for GroundBased Navigation Systems

*全球定位系统*. 2018, 43(6): 64–68

#### 因子图发展及其在定位与导航的应用技术

Development of factor graph and its application technology in positioning and navigation

*全球定位系统*. 2020, 45(1): 1–11



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12265/j.gnss.2023134

# 地磁导航定位技术原理与方法综述

林沂<sup>1</sup>, 孙晶京<sup>1,2</sup>, 闫旭<sup>1</sup>

(1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 山西农业大学基础部, 山西 太谷 030801)

**摘要:**地磁导航定位是多源融合导航定位技术体系中重要的技术手段之一, 具有适用范围广、抗电磁干扰能力强、可全天时全天候工作等优点, 为运动载体特别在地下、水下等卫星信号接收受限的场景提供一条无源被动的自主导航定位技术途径。然而地磁场导航定位的实现过程通常因其应用的载体和场景不同而存在一定差异, 本文将根据地磁导航定位的不同应用场景进行分类阐述, 对其相应的原理与方法进行综述, 以期助力地磁导航定位技术领域的后续推进。

**关键词:** 地磁导航定位; 航空地磁导航定位; 水下地磁导航定位; 地面地磁导航定位; 行人地磁导航定位

中图分类号: P228.41; P318

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2023)06-0032-10

## 0 引言

地磁导航定位是多源融合导航定位技术体系中重要的技术手段之一, 具有适用范围广、抗电磁干扰能力强、可全天时全天候工作等优点, 为运动载体特别是在地下、水下等卫星信号接收受限的场景中提供一条无源被动的自主导航定位技术解决途径<sup>[1-4]</sup>。

地磁导航定位利用地磁场强度随地理空间位置变化具有不同分布的特性, 实现对运动载体的定位。地磁导航定位系统通过安装在运动载体上的磁力仪, 获得运动航迹(轨迹)上的地磁场特征数据, 与预先存储的地磁场模型或地磁参考图进行匹配, 以确定运动载体的实时位置, 修正惯性导航系统(inertial navigation system, INS)误差。地磁场的 7 个地磁要素以及它们的组合都可以作为地磁特征数据。选择地磁导航定位特征数据主要需考虑以下几方面因素: 1) 空间差异明显; 2) 随时间变化缓慢; 3) 测量仪器能够准确测量; 4) 受外界干扰小。

地磁辅助导航定位的基本原理与重力辅助导航定位方式类似, 需要两套工作系统, 一套是预先处理系统, 一套是实时定位系统。预先处理系统主要完成地磁基准数据的准备; 实时定位系统主要包括地磁场

的实时测量和定位计算。

根据地磁导航定位应用的载体和场景不同, 其实现过程存在一定差异, 主要体现在: 1) 磁力仪传感器; 2) 实时测量方法; 3) 导航定位算法。本文将根据地磁导航定位的不同应用场景做分类阐述, 给出不同应用场景下的原理性实现过程<sup>[5]</sup>。

## 1 地磁导航定位常用磁力仪传感器

在分场景阐述地磁导航定位技术前, 首先概述常用的磁力仪传感器。目前市面上主流磁力仪传感器如表 1 所示。地磁场的标量测量主要使用质子旋进磁力仪、光泵磁力仪等传感器, 其显著特点是测量分辨率精度高、稳定性好, 但相应装置的体积较大, 功耗较高。因此, 标量测量适合外形尺寸较大的飞行器载体。地磁场的矢量测量主要使用磁通门磁力仪、磁阻传感器等, 同步测量地磁场矢量的三个分量。矢量测量可获取地磁场的三分量信息, 也可通过矢量求模计算间接获得磁场的总强度, 实现间接的标量测量。矢量磁力仪的测量精度、分辨率水平相对较低(0.1~5 nT), 但体积相对较小, 能耗、成本较低, 故适用于小型飞行器载体, 以及构建面向数据融合的多传感器测量系统。

收稿日期: 2023-07-11

资助项目: 国家自然科学基金项目(32171782)

通信作者: 林沂 E-mail: yi.lin@pku.edu.cn

表 1 主流磁力仪传感器

性能指标	磁通门磁力仪	光泵磁力仪	质子旋进磁力仪	磁阻传感器
测量原理	法拉第电磁感应,具体是根据物质的磁化非线性来测定磁场强度.它利用某些软磁材料作为磁芯,再将两级线圈绕在磁芯周围.时变磁场的影下,磁芯的磁化特性在饱和临界点出现周期变化,进而使磁芯上的线圈产生了随环境磁场变化的偶次谐波电势.这类传感器十分灵敏,分辨率高,鲁棒性好.磁通门传感器可用于地球物理勘探和INS等.	一些特殊的原子在外部磁场的作用下会出现塞曼分裂现象,分裂的大小与磁感应强度成比例,精确测定塞曼子能级间的频率,即可计算出此时外部磁场的大小.这样的原子主要有钾(K39);铷(Rb87, Rb85);铯(Cs133);氦(He4, He3).	依据拉莫尔磁矩进动现象,强磁场使水或碳氢化物中的质子极化,当强磁场突然去掉时,质子就以角速度 $\omega$ 绕地磁场旋进.测定质子的旋进频率即可算出地磁场总强度.	磁阻效应传感器是根据磁性材料的磁阻效应制成的.磁性材料(如坡莫合金)具有各向异性.当给带状坡莫合金材料通电流 $I$ 时,材料的电阻取决于电流的方向与磁化方向的夹角.磁阻效应传感器一般有四个这样的电阻组成,并将它们接成电桥.在被测磁场 $B$ 作用下,电桥中位于相对位置的两个电阻阻值增大,另外两个电阻的阻值减小.在其线性范围内,电桥的输出电压与被测磁场成正比.
测量物理量	矢量测量	标量测量,磁感应强度大小(模量)	标量测量,磁感应强度大小(模量)	矢量测量
分辨率/nT	0.01	0.001	0.01	300
响应频率/Hz	0~1 000	0~10	0~1	0~10 <sup>6</sup>
功耗	小于1 W	~5 W	~5 W	~1 MW
体积/mm <sup>3</sup>	32×32×150	φ 60×150	φ 75×175	5×5×1
重量/g	400	600	1 000	1
稳定性	零点随时间漂移较大	好	良好	零点随时间偏移、随温度漂移较大
抗冲击性能	良好	一般	一般	很好
动态响应性能	较好	一般	较差	良好
适用方向	车载、机载、船载、星载	机载、地面	不适合运动平台,适合静止观测	行人、机器人

## 2 航空地磁导航定位技术

航空地磁导航定位技术是指在飞行器载体内应用地磁导航定位技术,这里的飞行器指在大气层内,能飞离地面在空中飞行,可控制其飞行姿态和飞行高度的有人或无人飞行器.地磁导航定位技术可作为卫星导航定位技术、惯性导航技术等导航定位技术的补充.当卫星导航系统被干扰或不可用时,地磁导航定位系统与INS组合,可为飞行器提供位置坐标信息,提高整个导航定位系统的可靠性和稳定性.

### 2.1 航空地磁导航定位的特征量的选择

地磁导航定位参考的特征可以分为直接特征和间接特征,直接特征是指地磁场的七要素,比如地磁场总强度、磁偏角、地磁场北向分量等;间接特征是指除了地磁场的七要素以外的特征,比如地磁场的空间梯度、频谱特征等.在选择特征量时,对特征量的选择准则可概括为:1)特征量的长期变化比较稳定;

2)特征量的短期变化影响较小;3)特征量的实时测量对设备性能要求不高;4)基准图的获取相对容易.

根据航空地磁导航定位的飞行平台特点,地磁场的总场强度或者总场强度的梯度是比较适合航空地磁定位的特征量.由此传感器可选择光泵磁力仪或者磁通门磁力仪.

### 2.2 航空地磁测量的实现

航空地磁能否实现准确定位,在载体磁干扰下实现地磁场的实时准确测量是关键因素.载体的组成部件中的各类磁性体和金属导体,均在其周围空间产生各种复杂的随载体运动状态变化而变化的载体干扰磁场.特别在载体空间狭小,安装位置受限的情况下,干扰磁场具有相当强度,影响地磁场的准确测量,因此必须在实时测量过程中去除由于载体运动产生的干扰磁场<sup>[6]</sup>.

载体的机械结构、电控装置、发动机、随动部件等,均存在局部强磁场,此外,由于载体姿态的变化,

引起载体内部的磁通变化而产生涡流电场,进而产生涡流磁场.这些构成了对地磁场测量的复杂干扰.

载体固有磁干扰主要包括由载体结构中的硬磁材料产生的剩磁干扰,以及电控装置产生的杂散磁干扰等.载体固有磁干扰与运动状态无关,但在载体运动时,固有磁场矢量与地磁场矢量的夹角在不断变化,由此引起合成磁场变化,进而产生对测量结果的干扰.根据载体结构特点,因固有磁干扰引起的干扰是最严重的背景干扰,其干扰强度与固有磁性的量值成正比.

载体的动态磁干扰随着载体运动状态的变化而

发生改变,主要包括由载体结构受地磁场磁化而产生的感应磁场,以及壳体导电材料在地磁场中运动所产生的电涡流磁场等,其分布特性比较复杂,对地磁场实时测量结果产生显著干扰.

采用光泵磁力仪作为地磁总强度直接测量仪器,同时使用三轴矢量传感器等提供载体在背景场中的姿态信息,用背景干扰磁场补偿模型,对背景干扰磁场进行补偿,消除载体剩磁、感应磁场和涡流磁场对测量结果的影响,实现对磁场的精确测量,测量系统如图 1 所示.

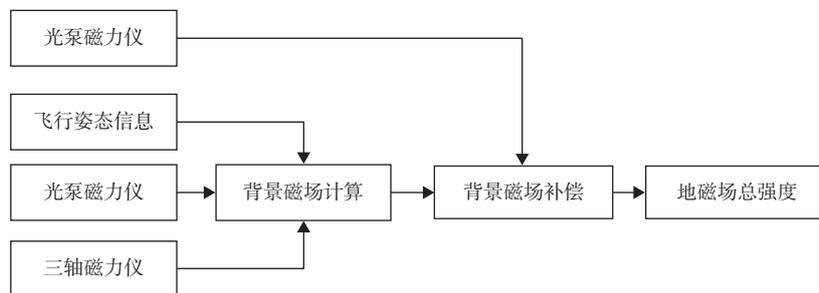


图 1 航空地磁精确测量系统

## 2.3 航空地磁导航定位方法

### 2.3.1 批相关匹配算法

在利用地球物理场进行导航的系统中,常采用的是批相关处理方法.航空地磁导航定位批相关处理技术的基本原理可参照水下地磁导航系统 (underwater geomagnetism contour matching, UGMCOM).其基本思想是:当载体运行一段时间后,将 INS 输出的位置估计序列输入预先存储的地磁场基准图得到对应的磁场强度序列 (推估强度序列),与由磁传感器测得的真实航迹下的地磁强度序列 (实测强度序列) 进行相关处理,所得相关极值点对应的位置就是匹配位置,然后利用这个位置来对 INS 进行修正.图 2 为基本原理示意图.

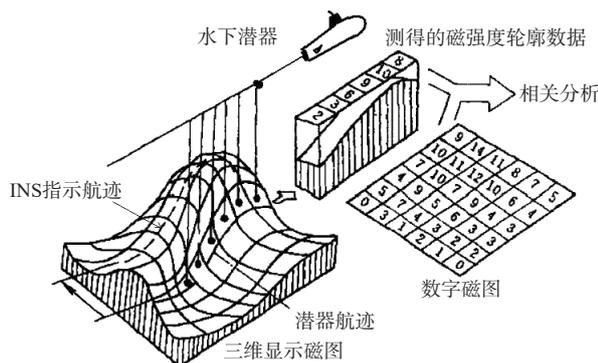


图 2 批相关匹配算法的基本原理示意图

批相关匹配算法具有如下优点: 1) 对初始位置误差要求低; 2) 不必对磁场做任何线性化假设,只要磁场变化特征明显就可以工作; 3) 求得的是全局最优解.

但批相关匹配算法也存在以下问题: 1) 如果推估强度序列由全局产生,即在整個地磁数字基准图中搜索; 2) 对导航系统在采集匹配数据期间的速度误差和航向误差敏感,因此采集数据的长度有限; 3) 存在基准磁图搜索间隔的量化误差,使用小的搜索间隔能减少这种误差,但会增加计算量; 4) 处理数据量大,对数字计算机要求高,实时性较难保证.无论是基准磁图的搜索、变换、相关计算、比较都有大量数据需要处理,故实时较差; 5) 由于在相关处理算法中,实测强度序列始终以磁传感器采集的数据为基准,并未考虑其误差,故此算法的鲁棒性差.

### 2.3.2 测量序列向上延拓的批相关匹配算法

通常地磁参考图仅是某一平面的已有数据,而且一般是通过海面测量或航空测量,通常是对应某一海拔高度.为此在探讨匹配定位的问题时,一个不容忽视的情况是参考图与测量序列的高度不统一.针对该情况,在探讨航空地磁批相关匹配的算法的同时,类似水下地磁导航定位,须引入对磁图高度不同于测量序列这一特殊情况的处理,即增加地磁数据的延拓处理.

测量序列向上延拓的批相关匹配算法 (UGMCOM based on measurement sequence upward continuation, MSUC-UGMCOM) 包含两个环节: 二维磁异常的向上延拓与批相关匹配. 首先对测量磁场强度序列进行分解, 分别获得其正常场与异常场部分. 正常场的计算利用的是有限距离内磁场强度差异度可忽略, 然后利用国际地磁参考场模型 (international geomagnetic reference field, IGRF) 模型计算磁图高度处的正常场值, 而异常场部分则作向上延拓运算. 将磁图高度处的计算正常场值与异常场值相加, 重新获得该处的地磁分布序列. 然后利用 UGMCOM 算法进行匹配定位.

选取某局部区域的地磁图, 如图 3 所示, 基于地磁异常上延操作准确度较高, 对其进行上延作为基准磁图. 而从已知地磁图中按照 INS 指示航迹抽取地磁总强度幅值序列, 加上测量的高斯白噪声作为真实测量序列. 然后利用 MSUC-UGMCOM 算法进行匹配定位.

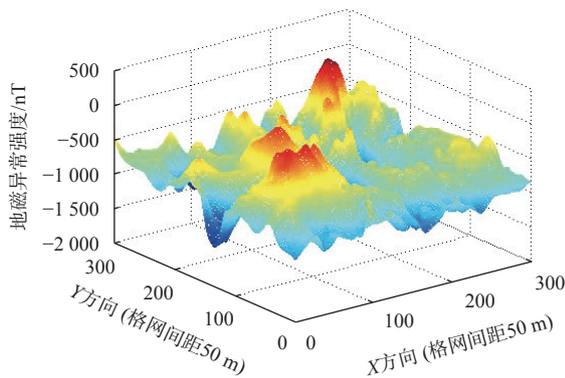


图 3 实测平面的某局部区域磁图

所用区域磁场的相关参数为: 经度范围为  $105.792^{\circ}\text{W}\sim 105.620^{\circ}\text{W}$ , 纬度范围为  $37.212^{\circ}\text{N}\sim 37.328^{\circ}\text{N}$ , 采样间距为 50 m, 高度为 150 m, 如图 4 所示, 构造基准磁图的上延高度为 100 m. 利用 IGRF

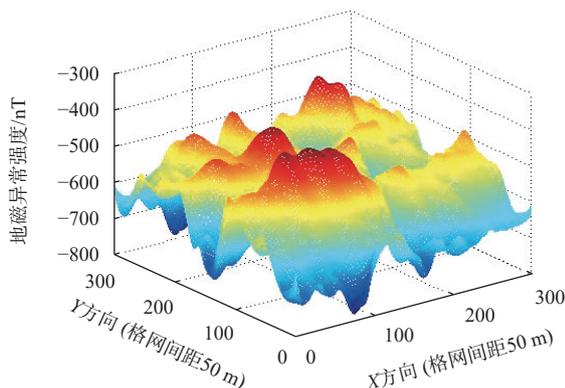


图 4 作为基准磁图的上延分布

模型计算得到的正常场平均值为  $52\,009.1\text{ nT}$ , 上延 100 m 正常场部分的差值为  $2.6\text{ nT}$ .

地磁测量的附加误差为幅值  $4\text{ nT}$  的高斯白噪声. INS 偏移误差为  $200\text{ m}$ , 采样序列累积长度为 30 个采样点, 采用 MSUC-UGMCOM 算法的定位结果如图 5 所示, 该算法具有基本的定位可用性. 但由于测量序列两端的断点对上延后的结果产生影响, 同时上延使得分布特征变弱, 因此需要对航空地磁匹配定位算法做进一步的思考.

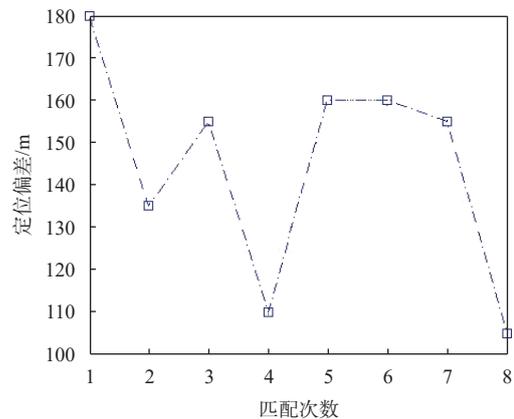


图 5 MSUC-UGMCOM 算法的定位结果

### 3 水下地磁导航定位技术

水下地磁导航定位技术是指在水面或水下航行器内应用地磁导航定位技术, 航行器是指可以航行于水面或水下, 或两者兼可的航行体, 包括载人航行器和无人航行器. 在海洋开发日益重要的现在, 航行器能够完成运输、勘探、侦测甚至是军事上的进攻防守等任务, 无论是在民用还是在军用上, 都扮演着重要的角色. 导航定位技术作为航行器能否顺利执行任务的关键技术之一, 发挥着重要作用. 地磁导航定位技术作为一种导航定位手段, 为航行器的导航定位提供了多一种选择<sup>[7-9]</sup>.

#### 3.1 水下地磁导航定位的特征量的选择

水下载体一般采取拖曳式测量方式, 磁力仪很难姿态稳定, 而且磁力仪的姿态和水下载体的姿态并不相同, 故无法通过水下载体的姿态测量系统获得磁力仪的姿态, 也无法获得磁传感器在大地坐标系下的姿态, 所以根据水下平台的运动和磁测特点, 水下应用地磁导航定位技术, 优选地磁场总场强度是比较适合的特征量, 磁力仪传感器可选择光泵磁力仪或者磁通门磁力仪, 光泵磁力仪可直接测得地磁场总强度, 磁通门磁力仪可通过三分量矢量求和的方式计算得到地磁场总强度<sup>[10]</sup>.

### 3.2 水下地磁测量的实现

为了减少船体对测量的影响,水下地磁测量尽量选择拖曳式测量方式,拖曳距离与船体的干扰大小有关,船体磁场越大,拖曳距离越远.一般选择 50~100 m.

对每一条测线根据起始位置判断测量方向,对于南北向测线,由南至北,需要减去拖鱼至差分全球定位系统 (Difference Global Positioning System, DGPS) 天线之间线缆长度;反之,则加上拖鱼至 DGPS 天线之间线缆长度.对于东西向测线,则需对测量数据进行  $X$  方向上位置修正,由西至东,需要在  $X$  方向上减去拖鱼至 DGPS 天线之间线缆长度;反之,则加上拖鱼至 DGPS 天线之间线缆长度.对于斜向,首先根据斜率分别计算  $X$ 、 $Y$  方向修正值,然后根据  $X$ 、 $Y$  方向分别进行修正<sup>[11-12]</sup>.

### 3.3 水下地磁导航定位方法

由于地磁本身存在的扰动性,以及磁力仪拖曳存在一定摆动<sup>[13]</sup>,即使对非线性函数采用高阶近似,仍然存在非量测的误差干扰.同时地磁场分布在量测序列的有限区间内,无法保证满足高斯分布.采用适用于较大干扰环境,基于蒙特卡罗随机采样的粒子滤波算法<sup>[14-18]</sup>,可以解决非线性动态系统过程状态非高斯分布的滤波问题.

滤波中应用蒙特卡罗方法可以追溯到 1969—1970 年.作为非线性滤波方法之一的粒子滤波,可以针对非线性和非高斯模型.它是一种对于给定状态变量分布序列提供迭代蒙特卡罗近似的算法,通过采集状态空间的大量点近似所需的概率密度函数 (probability density function, PDF),这些点被称为粒子.每一个粒子对应一个给定的权值,状态变量的分布可以采用依赖于每个粒子的离散分布近似,每个粒子赋予的概率正比于权重.这些粒子是按照所需 PDF 随机选定的采样.于是,随着粒子数目的增加,它们有效地提供了对于所需 PDF 的良好近似.粒子滤波不仅应用于航位推算<sup>[19]</sup>、地形导航<sup>[20]</sup>,而且用于目标的跟踪<sup>[21]</sup>,当前针对粒子滤波导航提出了一些改进算法<sup>[22-25]</sup>.

当系统维数较高时,单独采用粒子滤波将需要大量的粒子,使得运算量过大. Rao-Blackwellized 算法将系统分为非线性部分和近似的线性部分.对于其中的非线性部分,利用粒子滤波进行滤波;而剩余的线性部分则运用 Kalman 滤波器进行滤波.结合 Rao-Blackwellized 算法作为理论基础,探讨粒子滤波在位

置修正中的作用.

采用实测的海洋局部磁场数据,同时为弥补验证样本的多样性,采用另一航空磁测数据作为补充.两者均为规则格网形式.航空磁测数据的格网间距为 50 m,共  $480 \times 480$  个点.海洋磁测数据格网间距为 50 m,共  $50 \times 50$  个点.粒子采样数为 50 000.仿真实验结果如图 6~11 所示.

粒子滤波算法在初始采样估计的过程中,存在偏离载体真实位置的可能,但随着采样估计的递推,滤波效果由于粒子坍塌等问题偏差增大.采用重采样方法,可使定位结果回复至水下载体真实位置附近.同时虽然水下载体航行低速的特点对算法的实时性要求不高,粒子滤波算法的运算速度方面仍需改进.

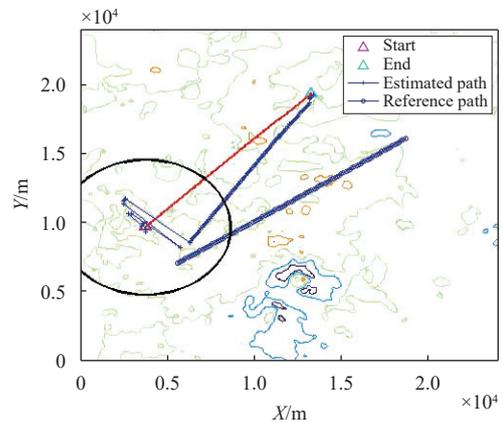
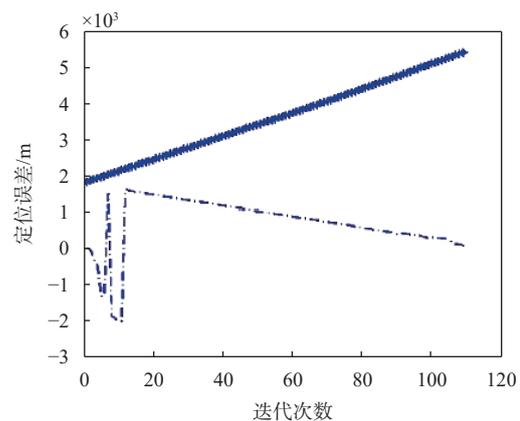


图 6 航空磁测数据仿真试验结果



注:虚线为粒子滤波迭代定位单方向误差,而实线为 INS 指示位置与真实航迹之间的偏差.

图 7 基于航磁北向定位误差

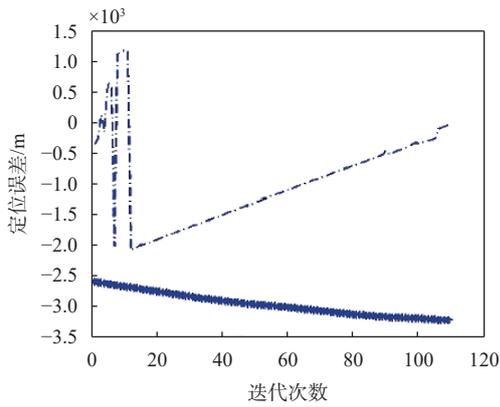


图 8 基于航磁东向定位误差

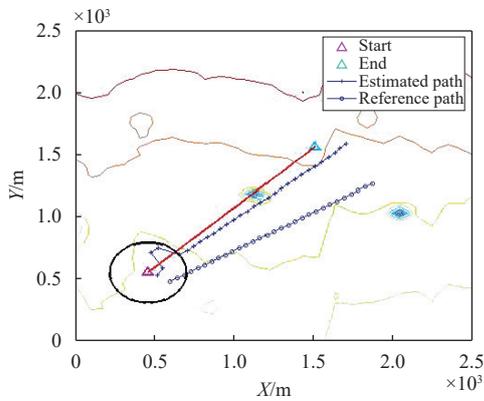


图 9 海洋磁测数据仿真试验结果

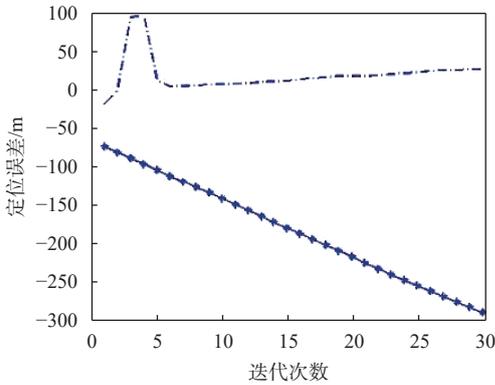


图 10 基于海磁北向定位误差

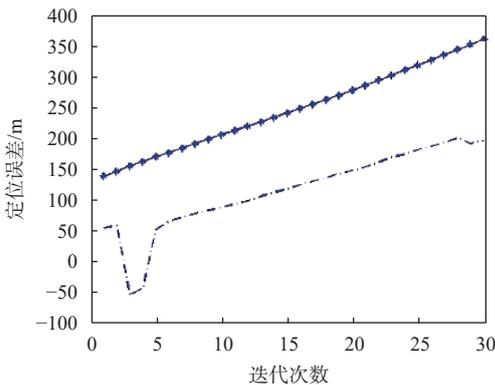


图 11 基于海磁东向定位误差

粒子滤波的改进算法有很多. 其中利用先验知识给出可能分布的一种近似, 是对该方法的有效改进之一, 如无迹粒子滤波 (unscented particle filter, UPF) 算法<sup>[26]</sup>. 这些方法为粒子滤波定位结果精度与运行速度的提高提供了可能. 实际上尽量使得测量序列呈现高斯状态也是一种改进的有效措施, 考虑到滤波模式并不存储前一状态的信息以提高效率, 序列的滤波消噪无法执行. 结合迭代点与上一点之前因高频采样存在冗余信息, 因此采用离线辨识的方法去除导致非高斯性明显的实时测量野值, 降低粒子数目, 提高定位精度及运行效率.

#### 4 地面车辆地磁导航定位技术

无人驾驶汽车和机器人等地面无人交通和运输工具, 给人们的工作和生活带来越来越多的便利, 随着 5G、高分辨率地图、传感器技术、人工智能技术等的发展, 无人驾驶车辆受到越来越多的关注, 成为新一代信息技术领域的研究热点<sup>[27-28]</sup>. 国内外对于无人驾驶汽车的研究多衍生于微型轮式移动车辆控制领域, 集中于对车辆局部周边环境感知、同时定位与地图构建、运动规划与控制的研究. 实时精确定位行驶中车辆对于车辆导航系统、车联网、无人驾驶汽车等智能车辆技术是十分重要的. 各种采用单一定位源进行独立的定位方案, 均存在不同类型缺点: GNSS 无法高频输出, 且受障碍物干扰严重; INS 定位误差随时间积累, 较长时间后定位结果存在很大偏差, 采用单一定位源的车辆定位方法可靠性无法保证. 近年来采用多传感器融合进行车辆定位的方法受到越来越高的重视, 特别是地磁导航定位技术, 是对现有导航定位技术的一个有效补充<sup>[4]</sup>.

##### 4.1 地面车辆地磁定位的特征量的选择

根据地面车辆的运动特点, 磁力仪可固定安装在车上, 与其他场景和平台不同之处在于, 道路上行驶的车辆除了可以选择地磁场总场强度以外, 还可以选择三分量作为地磁定位的特征量. 测力仪选择光泵磁力仪或者磁通门磁力仪.

##### 4.2 地面车辆地磁测量的实现

建立磁通门磁力仪零偏、灵敏度、正交误差角三个固有参数与输出磁场强度关系的理论模型, 通过标量匹配法, 给出基于最小二乘法求解传感器的 9 个固有参数求解算法, 然后对磁通门磁力仪的 9 个固有参数修正. 磁通门传感器校正流程如图 12 所示.

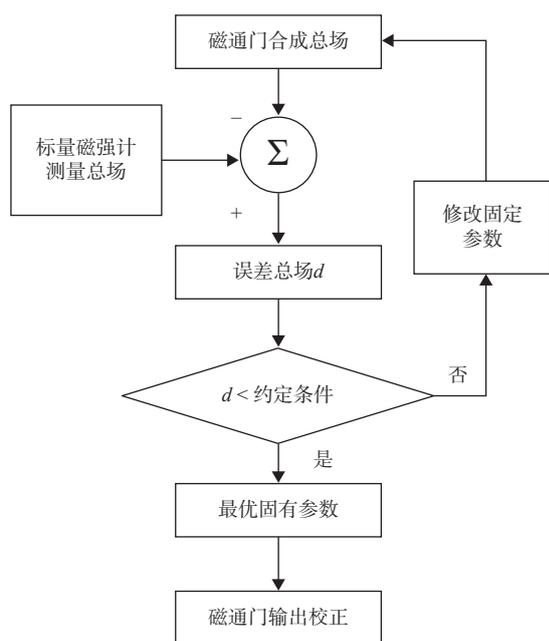


图 12 磁通门传感器校正流程

### 4.3 地面车辆地磁导航定位方法

匹配算法在测量噪声较低的情况下,定位效果较好.结合地磁场存在扰动的状况,对实测序列的降噪提出了明确的要求.首先需要剔除磁暴等引发的野值,其次需要减弱地磁场微扰动.虽然已提出的消噪方法整体上具有较好的效果,但仍无法避免定位判定函数的结果因单点的较大偏移而导致发散.因此对于定位判定规则同样进行考虑,采用 Huber 型  $M$ -估计的方法改进批相关函数.

$M$ -估计是最大似然率估计的一种常用形式,其中参数  $P$  可以通过最大化其对应的似然方程  $F$  来获得. Huber 函数是  $M$ -估计器的一种有效实现方式.它是 0 值附近的抛物线,在给定的  $|r| > k$  范围内线性增加,这限制了野值的影响.利用该估计器,标准正态分布接近 95% 的渐进效率可以通过调谐常数  $k = 1.345\sigma$  获得,其中  $\sigma$  是误差的估计标准偏差.对于调谐常数  $k$  的相同值,它对于很多正态分布同等有效. Huber 型  $M$ -估计器相关度 (Huber's  $M$ -estimation correlation, HMC) 给出了测量序列与基准磁图中的供比较序列之间的相似度量,它的值可以利用 Huber 统计计算得到.相关的掩膜函数可以压缩野值的影响.计算相关度的标准差  $\sigma$  是一个关键参数,它可以通过测量序列和可供比较序列的残差自适应寻找过程中计算出来.

作为鲁棒定位算法目标函数的 Huber 型  $M$ -估计器,它的掩膜函数减少了高噪声与缺失采样的影响,相对求解相关度的定位算法具有优势.结合侧重特征提取的定位定向算法与侧重目标确认的 Huber 型  $M$ -估计定位判定规则,可提供较佳的定位结果.

## 5 行人地磁导航定位技术

随着 GNSS 的成熟,面向行人的导航定位技术特别是室内/地下等封闭空间的行人定位成为研究热点.行人导航定位可以用于消费者在购物中心、车站、机场、场馆等的室内信息指引,特殊行业定位跟踪从而提升企业安全管理的智能化水平;在应急救援搜救、反恐、消防、军事、执法、罪犯跟踪等应用领域,通过定位掌握任务执行人员的位置和状态,确保任务安全可靠协同高效执行<sup>[4, 29-30]</sup>.位置服务对行人意义重大,但是人类 70% 的活动场景在室内,而 GNSS 适合室外无遮挡区域的位置服务,所以行人导航定位不能完全依赖 GNSS,地磁导航定位技术为行人在室内或者地下等封闭空间的位置服务提供了一种技术途径.

### 5.1 行人地磁定位的特征量的选择

磁场定位的工作过程如下,智能手机或者其他定制终端随着人的行走或者车的移动,其内部的磁传感器芯片不断采集行走/行驶路线上的磁场数据,将磁传感器实际测量的磁场数据与预先采集得到的地磁图进行搜索匹配.在地磁图内找到和测量磁场数据最相似的磁场数据所在的位置,即认为是智能手机所在的位置,即行人的位置.因此针对行人应用地磁定位,由于磁传感器无法和行人进行固定连接,只能选择地磁场总强度作为特征量<sup>[31]</sup>.

### 5.2 行人地磁测量的实现

人员定位对传感器的成本、大小和易用性提出了特别要求,随着芯片技术的发展,目前磁阻传感器已经可以满足人员定位需求,所以人员定位选择磁阻传感器作为磁场测量仪器,通过三分量磁场合成总场强度实现定位.

### 5.3 行人地磁导航定位方法

人员地磁定位方案,具体流程如图 13 所示.首先完成地磁数据库的构建;在定位阶段,提取智能手机提供的姿态信息(这里主要是航向,由于目前大多数的智能设备均提供了成熟的滤波算法用于获取设备姿态,因此本文未加入姿态滤波算法)、加速度、磁以及蓝牙扫描得到的信号强度,首先基于加速度数据进行行人步态检测及步长估计,并结合航向信息进行行人航位推算 (pedestrian dead reckoning, PDR),然后将磁场数据和 PDR 结果进行对应(这里选取 10 步长度的 PDR 结果),获取一定长度的含有相对位置的磁场数据,在蓝牙定位结果基础上,若当前的轨迹符合判别条件,则进行磁场匹配,输出磁场定位结果,若当前轨迹不符合判别条件,则直接输出蓝牙定位结果.

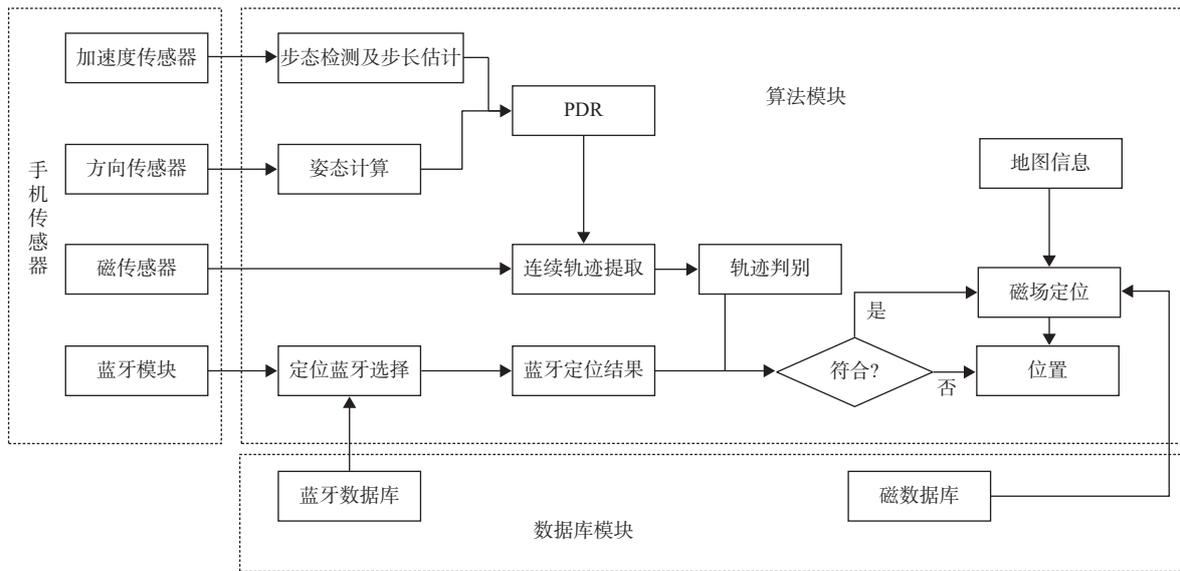


图 13 多源信息融合的室内定位方案

在图 13 所示的融合定位方案中, 轨迹判别主要基于当前提取轨迹的航向信息进行判别, 即航向变化小于某个阈值时进行后续的融合定位. 磁场导航定位流程如图 14 所示.

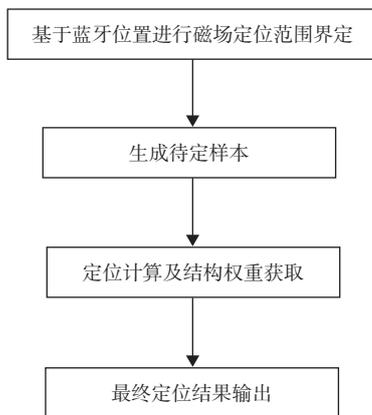


图 14 磁场定位流程

通过对多源信息融合定位方法进行行人地磁导航定位的试验验证, 选取的验证场所为办公室环境, 并包含一条长直的走廊. 扫描设备扫描到的场景平面图如图 15 所示, 长 50 m, 宽 20 m. 蓝牙基站的安装位置如图 16 所示, 总共安装有 14 个蓝牙基站. 生成的走廊内磁场的平面分布如图 17 所示, 构成了检测行人地磁导航定位的实验环境.



图 15 试验场景平面图



图 16 蓝牙基站安装位置

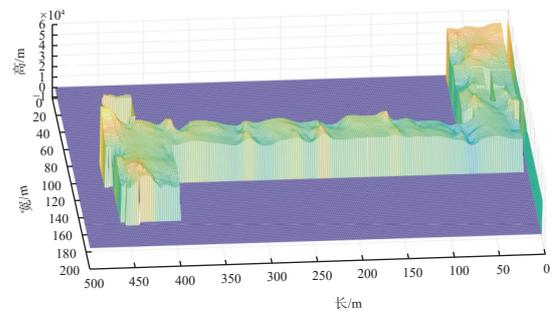


图 17 验证场景磁场分布图

进行导航定位验证时, 行走轨迹如图 18 所示, 实时定位结果如图 19 所示, 误差概率累积分布如图 20 所示, 60% 概率下定位误差小于 1.4 m. 上述结果基本验证了行人地磁导航定位的可行性.

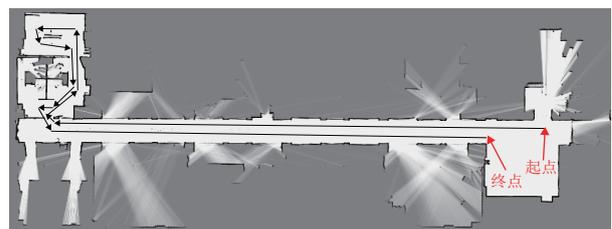


图 18 定位验证时行走轨迹

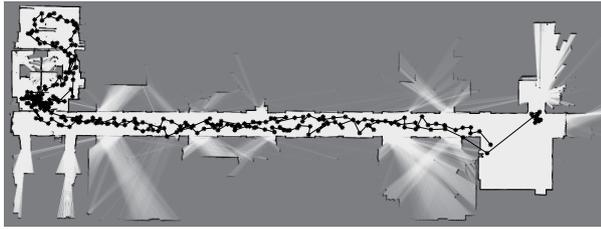


图 19 定位结果

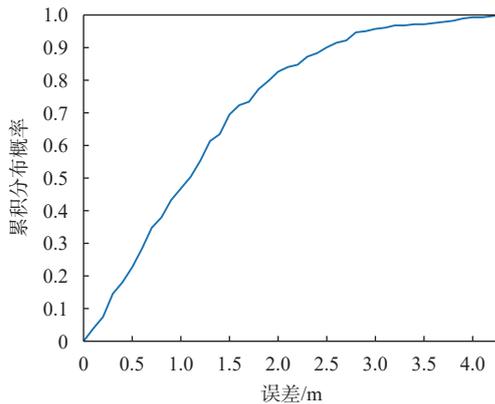


图 20 误差概率累积分布图

## 6 结束语

本文对地磁导航定位技术在不同的应用场景和应用平台下的实现过程进行了原理性描述和案例性验证, 由于磁场信息天然存在、变化丰富; 磁场定位是无源定位, 不需要借助外在通信信号, 不向外辐射能量, 隐蔽性强; 一般人工很难产生大范围的固有磁干扰, 影响环境磁场分布特性. 而环境中的电流、电气设备开关机、无线电等产生的随机干扰磁场其频谱和环境固有磁场的频谱存在明显差异, 可通过专业的磁信号处理方法进行识别处理, 因此磁场导航定位具有较强的抗干扰能力, 适应性较强, 由此, 为一系列特殊场景的导航定位提供了一条重要的技术途径. 随着人工智能<sup>[32]</sup>等技术的日渐引入, 地磁导航定位技术在不同的应用场景下, 将呈现出更为广阔高效的作用模式和发展前景.

致谢: 感谢尚可的讨论.

## 参考文献

- [1] FISHER K A, RAQUET J F. Precision position, navigation, and timing without the global positioning system[J]. *Air & space power journal*, 2011: 1-11.
- [2] GOLDENBERG F. Geomagnetic navigation beyond the magnetic compass[C]//2006 IEEE/ION Position, Location, And Navigation Symposium. DOI:10.1109/PLANS.2006.1650662
- [3] WILSON J M, KLINE-SCHODER R J, KENTON M A, et al. Passive navigation using local magnetic field variations[C]// Proceedings of the 2006 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, 2006.
- [4] 张万清, 李素敏. 地磁场资源在匹配制导中的应用研究 [J]. *制导与引信*, 2004, 25(3): 19-21.
- [5] 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.
- [6] 熊盛青. 我国航空重磁勘探技术现状与发展趋势 [J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(1): 113-117.
- [7] KATO N, SHIGETOMI T. Underwater navigation for long-range autonomous underwater vehicles using geomagnetic and bathymetric information[J]. *Advanced robotics*, 2009, 23(7a8): 787-803. DOI: 10.1163/156855309X443016
- [8] 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(3): 28-29.
- [9] 张文瑶, 裘达夫, 胡晓棠. 水下机器人的发展、军事应用及启示 [J]. *中国修船*, 2006(6): 37-39.
- [10] 周贤高. 水下地磁导航匹配算法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [11] 杨云涛. 导航定位中地磁测量误差补偿技术研究 [J]. *舰船科学技术*, 2019, 41(11): 125-128.
- [12] 林沂, 晏磊, 童庆禧. 水下地磁导航实时量测野值的离线模式辨识 [J]. *武汉理工大学学报*, 2008, 30(9): 112-115.
- [13] ABLOW C M, SCHECHTER S. Numerical simulation of undersea cable dynamics[J]. *Ocean engineering*, 1983, 10(6): 443-457. DOI: 10.1016/0029-8018(83)90046-X
- [14] 穆华, 任治新, 胡小平, 等. 船用惯性/地磁导航系统信息融合策略与性能 [J]. *中国惯性技术学报*, 2007, 15(3): 322-326.
- [15] 马明珠. 水下地磁辅助导航匹配算法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [16] 康健, 芮国胜. 粒子滤波算法的关键技术应用 [J]. *火力与指挥控制*, 2007, 32(4): 53-55.
- [17] 杨小军, 潘泉, 王睿, 等. 粒子滤波进展与展望 [J]. *控制理论与应用*, 2006, 23(2): 261-267.
- [18] 胡士强, 敬忠良. 粒子滤波算法综述 [J]. *控制与决策*, 2005, 20(4): 361-365, 371.
- [19] 李磊磊, 陈家, 斌谢玲, 等. 粒子滤波方法在 GPS/dr 组合导航系统中的应用 [J]. *微电子学与计算机*, 2004, 21(10): 97-99.
- [20] 姚智颖, 刘冬, 刘光斌. 基于粒子滤波的 INS/tan 组合导航 [J]. *电光与控制*, 2006, 13(3): 54-57.
- [21] 张宝亮, 杨柳, 张亮. 基于粒子滤波的红外目标跟踪新算法 [J]. *电子科技*, 2007(11): 22-25, 34.
- [22] 郝燕玲, 赵亚凤, 胡峻峰. 地磁匹配用于水下载体导航的初步分析 [J]. *地球物理学进展*, 2008, 23(2): 594-598.

- [23] 赵梅,张三同,朱刚.改进粒子滤波算法在组合导航中的应用[J].*中国公路学报*,2007,20(2):108-112.
- [24] 杜云明,李松.基于粒子滤波的改进算法[J].*黑龙江工程学院学报*,2007,21(2):36-40.
- [25] 李良群,姬红兵,罗军辉.杂波环境下被动多传感器机动目标跟踪新算法[J].*电子与信息学报*,2007,29(8):1837-1840.
- [26] BIRSAN M. Unscented particle filter for tracking a magnetic dipole target[C]//*Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE*, 2006. DOI:10.1109/OCEANS.2005.1639993
- [27] RAHOK S A, OZAKI K. Play-back navigation for outdoor mobile robot using trajectory tracking based on environmental magnetic field[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011. DOI:10.1109/ICRA.2011.5979873
- [28] RAHOK S A, SHIKANAI Y, OZAKI K. Trajectory tracking using environmental magnetic field for outdoor autonomous mobile robots[C]//2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010: 1402-1407. DOI:10.1109/IROS.2010.5651998
- [29] 王刚刚,李素敏,姜利辉,等.多源信息融合的智能手机室内定位技术[J].*卫星导航定位技术文集*,2020:260-266.
- [30] 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.
- [31] 陆妍玲,韦俊伶,刘采玮,等.融合地磁/wifi/pdr的自适应粒子滤波室内定位[J].*测绘通报*,2020(6):1-6.
- [32] LEE N K, AHN S, HAN D S. AMID: accurate magnetic indoor localization using deep learning[J]. *Sensors*, 2018, 18(5): 1598. DOI: 10.3390/s18051598

### 作者简介

林沂 男,博士,研究员,研究方向为激光雷达遥感技术.

孙晶京 女,博士,副教授,研究方向为无人机遥感技术.

闫旭 女,研究方向为偏振遥感.

## A review of the principles and methods of geomagnetic navigation and positioning technology

LIN Yi<sup>1</sup>, SUN Jingjing<sup>1,2</sup>, YAN Xu<sup>1</sup>

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Foundation Department, Shanxi Agricultural university, Taigu 030801, China)

**Abstract:** As one of the important technical means in the multi-source fusion navigation and positioning technology system, geomagnetic navigation and positioning has the advantages of wide application range, strong anti-electromagnetic interference ability, all-weather operation, etc., which provides a passive and autonomous navigation and positioning technology approach for the moving carrier, especially in the underground, underwater and other scenes where satellite signal reception is limited. The realization process of geomagnetic navigation positioning varies due to different carriers and scenarios of geomagnetic positioning application. This paper elaborates the representative principles and methods of geomagnetic navigation and positioning in its different application scenarios, in order to promote the development of this promising field.

**Keywords:** geomagnetic navigation and positing (GMNP); aeromagnetic GMNP; underwater geomagnetic GMNP; ground GMNP; pedestrian GMNP