

一种磁异常梯度测量的地磁/惯性 融合导航方法*

梁宇潇 高 东

(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 地磁导航是一种基于地球天然磁场的导航方法, 其自主性强, 抗干扰性能好, 可以在多种环境下正常工作, 但低空/水下地磁匹配导航需要基于大量测量数据构建地磁图且对于平台计算能力要求较高, 给地磁导航的应用带来不便. 惯性导航在短时间内精度较高, 但随着时间推移会出现较大的累积误差. 本文将从地磁总场中提取的磁异常场前后两次测量间的差分信息作为观测量, 依据磁异常场的偶极子特征, 基于磁偶极子模型理论推导了应用于导航系统滤波器的磁异常梯度测量矩阵, 提出利用磁异常梯度信息修正惯性导航系统的误差的地磁/惯性融合导航方法, 降低了地磁导航对先验地磁图的要求, 同时修正了惯导导航误差. 对比纯惯性导航, 相同条件下该方法的导航位置精度有显著提升, 为运动平台自主导航探索了一种新方法.

关键词 地磁导航, 惯性导航, 磁偶极子, 融合导航

中图分类号 V249.3

Geomagnetic/Inertial Fusion Navigation Method Based on Magnetic Anomaly Gradient Measurement

LIANG Yuxiao GAO Dong

(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Geomagnetic navigation is an autonomous navigation method that utilizes the natural magnetic field of the Earth. It has various advantages such as strong autonomy and good anti-interference performance, and can work normally in various environments to play its role. However, in the fields of low altitude navigation and underwater navigation, geomagnetic matching navigation requires the construction of geomagnetic maps based on a large amount of measurement data, and requires the motion

* 中国科学院国防科技重点实验室基金项目资助 (CXJJ-22S017)

2024-02-23 收到原稿, 2024-04-18 收到修定稿

platform equipped with this navigation method to have high computing power. The above issues bring inconvenience to the application of geomagnetic navigation. Inertial navigation method is a commonly used autonomous navigation method that has high accuracy in a short period of time. However, over time, its navigation results will have significant cumulative errors, which will affect the accuracy of navigation positioning. This article extracts differential information of magnetic anomaly fields from the total measurement information of the Earth's magnetic field through differential measurement information at different positions during platform movement, as the observation of the paper. Meanwhile, based on the magnetic dipole characteristics of the magnetic anomaly field, this article derives a magnetic anomaly gradient measurement matrix that can be applied to navigation system filters on the basis of the magnetic dipole model theory. By using the magnetic anomaly gradient information to correct the cumulative error of the inertial navigation system, a geomagnetic/inertial fusion navigation method is proposed. This method can reduce the requirement for high-precision prior geomagnetic maps in geomagnetic navigation, while also correcting navigation errors in inertial navigation. Comparing the navigation method proposed in this article with the pure inertial navigation method, it was found that the navigation position accuracy of this method has significantly improved under the same conditions. The research conducted in this article explores a new method for autonomous navigation of motion platforms.

Key words Geomagnetic navigation, Inertial navigation, Magnetic dipole, Fusion navigation

0 引言

近年来,导航技术从单一传感器导航发展到组合导航系统,多种导航方式被优化配置,进行性能优势互补,使导航系统的精度和可靠性都有了大幅度的提升.地磁/惯性组合导航系统是一种稳定可靠的低成本自主导航系统,具有广阔的应用前景.为提高地磁/惯性组合导航系统的精度,一方面需要不断提升惯性器件的性能,另一方面开展了地磁信息精确测量、高精度地磁模型建立、改进滤波方法、改进匹配方法等方面的研究,目的是提高最终的融合导航精度^[1].

地磁导航 (Geomagnetic Navigation, GN) 是一种非卫星导航定位方法,具有全天时、全天候、全地域、无源、无辐射、导航误差不随时间累积等优点.其采用的磁传感器通常具备成本较低、体积小、质量轻、功耗低等优势,对运动平台的要求低,便于推广应用.作为一种可靠的辅助导航方法,地磁导航早在20世纪就被认知并开展了研究,在航空、航天、水下、轨道、车辆等导航定位领域中发挥了自主导航作用^[2].惯性导航系统 (Inertial Navigation System, INS) 是通过惯性元件感知运动平台位置姿态信息进行导航定位的自主导航方法,其导航信息连续且噪声低,数据更新率高,在短期内精度和稳定性较好,但其导航定位信息解算误差会随时间累积,长时间工作时

精度会大幅下降.将地磁导航与惯性导航进行融合,可以充分发挥地磁导航在高度确定方面的优势,弥补惯性导航在此方面的劣势,同时惯性导航可以弥补地磁导航在经纬度确定方面的劣势,所以地磁/惯性融合导航是一种非常“融洽”的融合导航方式.

根据工作原理,可以将主流的地磁导航方法分为地磁滤波方法和地磁匹配方法.地磁滤波导航一般应用于航天领域,其采用滤波的形式建立起一个数学模型,将实际测量得到的地磁场数据与系统状态之间进行关联.首先利用INS或其他导航定位系统提供的信息进行自身的状态估计,随后通过滤波获取到系统的修正信息,对状态估计进行校准,从而更加准确地跟踪系统的位置、速度等状态,抑制误差随时间发散.文献[3,4]仅依靠磁力计和磁场模型就可以实现卫星姿态的确定,为小微卫星提供了一种低成本自主姿态确定方法.测量差分扩展卡尔曼滤波器(MDEKF)能够使地磁导航算法在磁暴影响下继续工作,基于神经网络地磁场误差补偿(NNGFEC)模型的地磁导航算法,使纯地磁导航近地卫星轨道位置误差小于1 km^[5].地磁/惯性深度融合导航方法通过去劣存优,充分利用地磁导航和惯性导航各自在三轴方向上定位的优点,进一步提升了地磁/惯性自主导航的精度^[6].

地磁匹配导航是脱胎于地形匹配和图像匹配领域的方法,其需要建立精确的地磁图,将实时采集到

的地磁场测量信息与已经建立的地磁图的磁场进行匹配, 得到运动平台的位置或位置修正量, 从而对系统状态进行校准. 该方法在航空和水下等领域中得到了广泛应用, 针对匹配区域选择、匹配效率等问题, 引入强化学习和神经网络等人工智能方法的优化思路被提出, 提高了匹配速度和匹配率, 并在弱地磁特征区域仍有较好的匹配效果^[7-9].

地磁异常场是地球天然磁场的组成部分, 其在近地空间的特征随空间位置变化显著, 且几乎不随时间改变, 多作为地磁匹配导航的基准磁场. 经过分析, 地磁异常场呈区域性遍布全球各地, 局部区域的地磁异常场可以用远场磁偶极子模型进行近似表述. 磁偶极子模型可以提供对地磁异常场的表征, 能够描述地磁异常场特征与空间位置的关系, 因此可以通过磁偶极子模型利用地磁异常场信息进行地磁导航.

目前获取地磁异常场信息的方法是通过标定精确磁力计获取精确测量的地磁总场信息, 采用高精度地磁模型计算出地磁正常场信息, 将二者相减, 得到所需信息^[10-13]. 在该过程中, 地磁模型误差、测量误差以及计算误差都会影响所得到的地磁异常场信息的准确度, 并最终干扰自主导航系统的工作.

地磁导航的各种实现方法都需要精确的先验地磁模型或地磁精准图, 且容易受到磁活动影响, 尤其是地磁匹配导航所需的地磁基准图存在采集困难、制备繁琐、占用内存空间大等缺点, 影响了地磁/惯性融合导航系统的推广应用^[14-16].

本文采用磁偶极子模型为地磁导航提供地磁异常场模型, 需要的先验信息较少, 对模型进行分析提出采用相邻两次测量点磁场梯度获取地磁异常场信息的磁测方法, 并通过推导磁异常梯度信息与空间位置变化量之间的关系, 提出了一种利用地磁异常场梯度信息修正惯性导航累积误差的地磁/惯性导航方法. 该方法采用磁偶极子模型的磁矩和位置信息作为地磁先验信息, 对地磁先验信息要求极低, 且计算量小, 运算速度快, 探索了地磁/惯性融合导航新形式, 为地磁/惯性融合导航的发展注入了新的活力.

1 磁异常信息获取

磁力计的测量信息是总磁场的值, 其中包含正常场、异常场以及干扰场, 正常场的大小一般远大于异

常场, 干扰场的值在总磁场中占比很低, 一般可以忽略不计. 获取异常场值是利用其进行导航定位的第一步, 通常使用测量信息减去地磁场模型估计的正常场值, 对磁异常值进行粗略估计. 本文提出一种根据相邻两次磁场测量信息解算磁异常值的方法, 无须依靠地磁场模型便可得到磁异常场信息, 拓展了地磁导航的应用范围.

1.1 磁异常信息获取方法

1.1.1 测量磁场构成及特性

地球磁场是伴随地球存在的天然物理场, 从行星整体视角来看, 地球磁场一般是由地磁北极区域指向地磁南极位置区域, 而地磁南北极与地理南北极是反向对应的关系. 地球表面的磁场分布与地理位置、铁磁性物质分布紧密相关, 总体而言, 两极到赤道的磁场由强到弱变化. 地磁场的三轴矢量强度与空间位置是一一对应的关系, 并在大时间尺度上会进行变化.

在实际测量中, 磁场强度由如下 4 个部分组成:

$$\mathbf{B}(r, t) = \mathbf{B}_m(r, t) + \mathbf{B}_c(r, t) + \mathbf{B}_d(r, t) + \mathbf{B}_i(r, t). \quad (1)$$

其中, $\mathbf{B}_m(r, t)$ 为主要磁场, 来源于地核, 在总磁场中占据约 95% 的大小, 随时空变化较为缓慢, 可以通过球谐函数模型进行描述. 在地磁导航中被广泛使用的 IGRF (International Geomagnetic Reference Field) 模型是一个最高阶次为 13 阶的全球主磁场模型, 每 5 年发布一次高斯系数, 在系数发布初期计算精度较高, 但到模型适用周期的中后期其误差将增大到开始的两倍以上. $\mathbf{B}_c(r, t)$ 为磁异常场, 主要来源于地壳内部的铁磁性物质和人类的生产活动, 在总磁场中占比约为 4%, 其稳定性更强, 几乎不随时间变化, 随空间变化速度快于主磁场. $\mathbf{B}_d(r, t)$ 和 $\mathbf{B}_i(r, t)$ 都来自磁干扰, 前者主要来源于地球电离层的规律性和随机性活动以及地外天体活动带来的影响, 后者主要是运动平台本身带来的磁场干扰.

在磁异常导航环境中, 在测量点到磁源的距离大于三倍磁源自身尺寸的条件下, 可以将磁源视为磁偶极子, 磁异常场可以用单磁偶极子模型进行描述. 磁偶极子模型是在电偶极子模型理论上提出的, 可以将单磁偶极子近似看作由闭合电流回路产生的, 根据毕奥-萨伐尔定律可以得到磁偶极子模型的磁感应强度函数表达式为

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} \left[\frac{3(\mathbf{M} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r}}{r^2} - \mathbf{M} \right]. \quad (2)$$

其中, $\mathbf{M} = [H_x \ H_y \ H_z]^T$ 为磁偶极子磁矩, 在当前坐标系下进行描述, μ_0 为介质磁导率, 一般取真空磁导率进行计算, $\mathbf{r}$ 为当前坐标系下磁偶极子中心点至测量点的位置矢量.

在一定区域内, 主磁场的强度变化相较于异常场不明显, 同时假设测量值中运动平台剩磁干扰已经被滤除, 可以认为在相邻两次测量点空间位置差距较小的情况下, 磁场测量值的差分可以近似看作磁异常场强度的差分, 利用这一性质, 并结合磁偶极子模型进行推导, 可以从磁场测量值中获取磁异常信息.

1.1.2 磁异常场差分计算方法

磁异常场随空间位置变化速度远大于主磁场, 测量得到的总磁场梯度张量也可以被近似认为是磁异常场的磁异常场梯度张量, 即 $\mathbf{G} = \nabla \mathbf{B} \approx \nabla \mathbf{B}_c$, 对 $\mathbf{B}$ 的矩阵形式进行梯度计算, 可将磁异常场梯度张量表示为

$$\mathbf{G} = \nabla \mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[6 \times \frac{\mathbf{M} \cdot \mathbf{r}}{r^5} + 3 \times \frac{\mathbf{M} \cdot \mathbf{r}}{r^5} \cdot \mathbf{I} - 15 \times \frac{\mathbf{M} \cdot \mathbf{r}}{r^7} \mathbf{r} \cdot \mathbf{r} \right]. \quad (3)$$

右边乘 $\mathbf{r}$, 并带入 $\mathbf{r} \cdot \mathbf{r} = r^2 \mathbf{I}$, 可将上式变形为

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{r} = -\frac{3\mu_0}{4\pi} \left[3 \times \frac{(\mathbf{M} \cdot \mathbf{r}) \cdot \mathbf{r}}{r^5} r^2 - \frac{\mathbf{M}}{r^3} \right]. \quad (4)$$

观察式 (4), 得到如下位置矢量、磁异常场梯度张量和磁异常场感应强度之间的关系:

$$\mathbf{r} = -3\mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{B}. \quad (5)$$

取当前测量点位置矢量为 $\mathbf{r}_1$, 上一个测量点位置矢量为 $\mathbf{r}_p$, 令 $\mathbf{g} = \mathbf{G}^{-1}$, 则得到

$$\mathbf{r}_1 = -3\mathbf{g}_1 \cdot \mathbf{B}_1, \quad (6)$$

$$\mathbf{r}_p = -3\mathbf{g}_p \cdot \mathbf{B}_p. \quad (7)$$

式 (6) 减去式 (7), 得到

$$\mathbf{B}_1 = \Delta \mathbf{g}^{-1} \cdot \left(-\frac{\Delta \mathbf{r}}{3} - \mathbf{g}_p \cdot \Delta \mathbf{B} \right). \quad (8)$$

式中, $\Delta \mathbf{g}$ 为磁异常梯度张量变化量, $\Delta \mathbf{r}$ 为位置变化量, $\Delta \mathbf{B}$ 为磁异常场感应强度变化量, $\mathbf{g}_p$ 为上一个测量点的磁异常梯度张量的逆.

磁场梯度张量一般通过磁测阵列获取, 根据测量需求, 磁测阵列具备多种成熟构型方案, 十字形构型的磁张量测量阵列误差较小, 结构简单, 可以兼容多种运动平台, 为本文所采用的磁测阵列构型, 该构型如图 1 所示, 图 1 中 d 为磁测阵列基线长度.

磁场梯度张量的矩阵元素如下:

$$\mathbf{G} = \nabla \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_x}{\partial x} & \frac{\partial B_x}{\partial y} & \frac{\partial B_x}{\partial z} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} & \frac{\partial B_y}{\partial y} & \frac{\partial B_y}{\partial z} \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} & \frac{\partial B_z}{\partial y} & \frac{\partial B_z}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{yz} \\ B_{zx} & B_{zy} & B_{zz} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

磁偶极子场是无源无旋场, 因此可以得到磁场梯度张量各元素之间的关系为

$$\begin{aligned} B_{xx} + B_{yy} + B_{zz} &= 0; \\ B_{xy} &= B_{yx}, \quad B_{xz} = B_{zx}, \quad B_{zy} = B_{yz}. \end{aligned} \quad (10)$$

式 (9) 可以表示为

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{zx} \\ B_{xy} & B_{yy} & B_{zy} \\ B_{zx} & B_{zy} & -B_{xx} - B_{yy} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

如图 1 所示, 设磁强计 S1, S2, S3, S4 测得的磁感应强度分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_1 &= \begin{bmatrix} B_{1x} \\ B_{1y} \\ B_{1z} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} B_{2x} \\ B_{2y} \\ B_{2z} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_3 &= \begin{bmatrix} B_{3x} \\ B_{3y} \\ B_{3z} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_4 = \begin{bmatrix} B_{4x} \\ B_{4y} \\ B_{4z} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (12)$$

则该磁测阵列坐标系中心 O 点处的磁场梯度张量矩阵可以表示为

$$\mathbf{G} \approx \frac{1}{d} \begin{bmatrix} B_{1x} - B_{3x} & B_{1y} - B_{3y} & B_{1z} - B_{3z} \\ B_{1y} - B_{3y} & B_{2y} - B_{4y} & B_{2z} - B_{4z} \\ B_{1z} - B_{3z} & B_{2z} - B_{4z} & B_{3x} - B_{1x} + B_{4y} - B_{2y} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

其中, d 为磁测阵列基线长度.

根据式 (8) 和式 (13) 可以从前后两个位置的测量信息中获取到磁异常场估计值, 为减少噪声影响, 采用稳健二次回归方法对测量值和计算得到的估计值进行平滑处理.

采用图 1 所示的十字形磁测阵列对磁异常特征梯度进行测量时, 阵列基线长度的选择一般在 0.1 m 到 0.5 m 不等, 实际应用中基线长度选取应考虑多重因素, 需要根据磁强计型号和磁异常梯度测量需求确定阵列基线长度. 本文主要目的是通过 MATLAB 仿真验证所提出导航算法的可行性, 因此选取磁测阵列基线长度为 0.1 m^[17-19].

1.2 准确率分析

在缓慢变化的主磁场中放入一个偶极子磁源模拟磁场环境, 采用 1.1 节中的方法进行磁异常信息的获取, 以验证该方法的有效性. 设定四条轨迹分别经过磁异常信息显著区域和磁异常信息微弱区域, 获取磁异常估计信息, 将其与真实值进行对比, 磁测轨迹如图 2 所示, 每条轨迹长度均为 12.75 km.

图 3 为四条轨迹上获取到的磁异常场估计值与实际值的误差, 从距离轨迹起点 250 m 处开始, 在磁测轨迹上每间隔 5 m 进行一次磁异常估计, 图中横坐标为估计的次数. 轨迹 1、轨迹 3 和轨迹 4 都处在磁异常信息微弱的区域, 其普遍误差在 0.2 nT 以内. 轨迹 2 从磁异常信息微弱区域出发, 穿过磁异常场中心

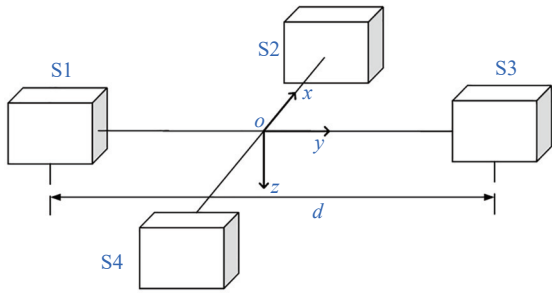


图 1 十字形磁张量测量矩阵

Fig. 1 Cross shaped magnetic tensor measurement matrix

信息显著区域, 到远离磁源位置结束, 其普遍误差在 0.1 nT 以内. 可以观察到四条轨迹上都出现了异常误差峰, 但出现时间均较短, 结合轨迹与磁场的关系, 认为其产生的原因是在穿越磁异常场正负值交界区域时受到正负异常场的影响所致, 经过该区域后能够迅速恢复正常精度. 总体而言, 该方法能够提供较为准确的磁异常场信息, 且磁测轨迹越接近磁源中心误差越小, 基本满足使用要求.

2 状态空间模型与滤波器设计

假设运动平台为固定翼无人机, 地磁/惯性融合

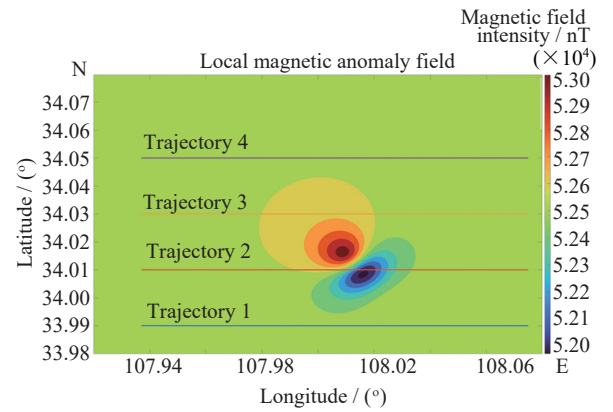


图 2 磁测轨迹

Fig. 2 Magnetic measurement point trajectory

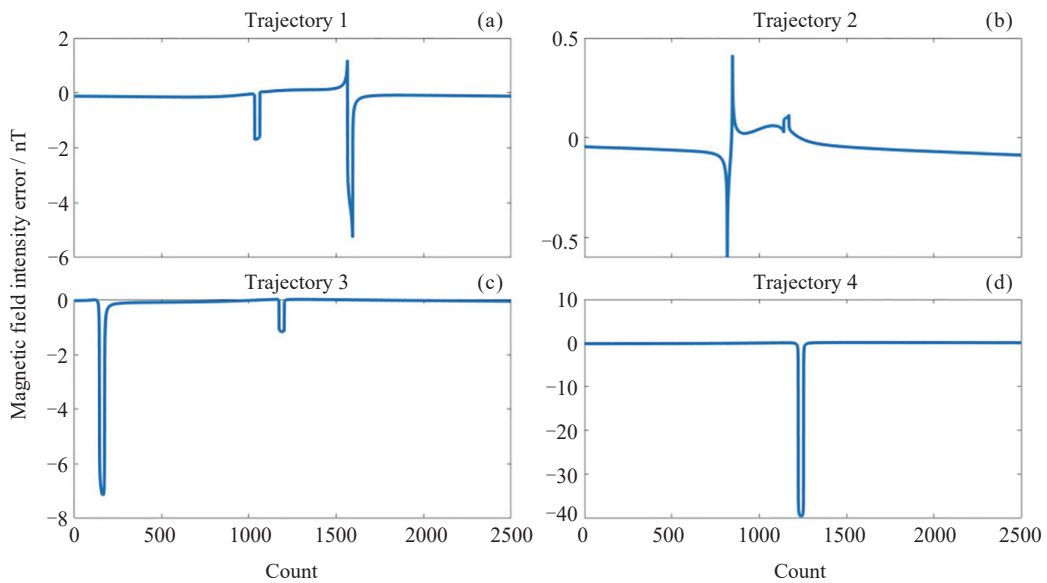


图 3 磁异常估计误差

Fig. 3 Measurement error of magnetic anomalies

导航系统由磁场信息处理子系统、惯性导航与测量模型和滤波子系统三部分组成,如图4所示.首先根据无人机运动学模型及其误差建立系统状态方程,分析磁异常场值和磁偶极子模型计算值之间的关系和测量误差建立测量方程;采用卡尔曼滤波器对运动平台位置和速度进行在线估计.首先进行时间更新,即通过惯性导航系统对当前时刻状态量进行一步预测,然后进行测量更新,由状态量一步预测值和磁偶极子模型进行测量的一步预测(测量矩阵),之后通过预测和磁力计测量值得到修正信息,在测量更新环节修正惯性导航系统所给出的位置变化量,最后获取当前时刻状态量的最优估计.

2.1 系统状态空间模型

2.1.1 系统状态方程

建立系统误差模型后,选取姿态角误差、速度误差、位置误差、陀螺仪测量零漂、加速度计零漂等作为状态量,即

$$\mathbf{X}(t) = [\phi^T \ (\delta \mathbf{v}^n)^T \ (\delta p)^T \ (\varepsilon^b)^T \ (\nabla^b)^T]^T. \quad (14)$$

则可以将系统的状态方程表示为

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}\mathbf{X} + \mathbf{G}\mathbf{W}^b. \quad (15)$$

其中, $\mathbf{X}$ 为状态向量, $\mathbf{F}$ 为状态转移矩阵, $\mathbf{G}$ 为噪声输入矩阵, $\mathbf{W}$ 为噪声向量. 状态方程的详细公式可参见文献[20].

2.1.2 磁异常矢量的测量方程

选取测量量为磁异常矢量,测量方程写为

$$\mathbf{Z}[t] = \mathbf{B}[\mathbf{X}_E(t), t] + \mathbf{v}(t). \quad (16)$$

其中, $\mathbf{Z}[t]$ 为磁异常矢量的观测值, $\mathbf{B}[\mathbf{X}_E(t), t]$ 为磁异常矢量的实际值, $\mathbf{X}_E(t)$ 为运动平台在地心地固坐标系下的位置向量, $\mathbf{v}(t)$ 表示测量噪声,该噪声包含

磁力计的测量噪声和一定程度的磁偶极子模型误差. 设磁偶极子坐标系为原点在磁源中心、三轴平行于地心地固坐标系的直角坐标系,测量坐标系选取地心地固坐标系,记磁异常矢量为

$$[\mathbf{X}_E(t), t] = [B_x \ B_y \ B_z]^T. \quad (17)$$

对测量方程进行线性化和离散化,将其在最优估计 $\hat{\mathbf{X}}_E(t)$ 处进行泰勒级数展开,并保留一阶项,即

$$\mathbf{Z}[t] = \mathbf{B}[\mathbf{X}_E(t), t] + \left. \frac{\partial \mathbf{B}[\mathbf{X}_E(t), t]}{\partial \mathbf{X}_E^T} \right|_{\mathbf{X}_E(t) = \hat{\mathbf{X}}_E(t)} [\mathbf{X}_E(t) - \hat{\mathbf{X}}_E(t)] + \mathbf{v}(t). \quad (18)$$

设磁异常矢量对位置矢量 $\mathbf{X}_E(t)$ 求一阶偏导数为

$$\mathbf{H}_B = \frac{\partial \mathbf{B}[\mathbf{X}_E(t), t]}{\partial \mathbf{X}_E^T}.$$

分析磁偶极子模型和磁异常场的性质,可以认为在较长的时间周期内,磁异常矢量仅与位置信息有关,且 $\mathbf{X}_E(t)$ 和测量点在磁偶极子坐标系下的位置矢量 $\mathbf{X}_D(t) = [x \ y \ z]^T$ 之间的坐标转换关系为常值的平移变换,则可以将 $\mathbf{H}_B$ 表示为

$$\mathbf{H}_B = \frac{\partial \mathbf{B}[\mathbf{X}_D(t), t]}{\partial \mathbf{X}_D^T} = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_x}{\partial x} & \frac{\partial B_x}{\partial y} & \frac{\partial B_x}{\partial z} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} & \frac{\partial B_y}{\partial y} & \frac{\partial B_y}{\partial z} \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} & \frac{\partial B_z}{\partial y} & \frac{\partial B_z}{\partial z} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

为便于计算,给出如下磁异常矢量各元素的表达式:

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\mu}{4\pi} \left[\frac{1}{r^5} (3x^2 - r^2) H_x + \frac{3}{r^5} xy H_y + \frac{3}{r^5} xz H_z \right], \\ B_y &= \frac{\mu}{4\pi} \left[\frac{3}{r^5} xy H_x + \frac{1}{r^5} (3y^2 - r^2) H_y + \frac{3}{r^5} yz H_z \right], \\ B_z &= \frac{\mu}{4\pi} \left[\frac{3}{r^5} xz H_x + \frac{3}{r^5} yz H_y + \frac{1}{r^5} (3z^2 - r^2) H_z \right]. \end{aligned} \quad (20)$$

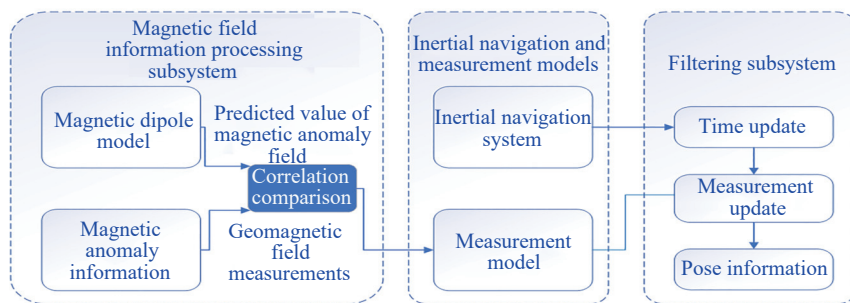


图4 地磁/惯性融合导航系统

Fig. 4 Geomagnetic/inertial fusion navigation system

得到 $\mathbf{H}_B$ 的各元素为

$$\begin{aligned}
\frac{\partial B_x}{\partial x} &= \frac{\mu}{4\pi} \left\{ [(-15x^2H_x - 15xyH_y - 15xzH_z)r^{-6} + 3r^{-4}H_x] \frac{\partial r}{\partial x} + (6xH_x + 3yH_y + 3zH_z)r^{-5} \right\}, \\
\frac{\partial B_x}{\partial y} &= \frac{\mu}{4\pi} \left\{ [(-15x^2H_x - 15xyH_y - 15xzH_z)r^{-6} + 3r^{-4}H_x] \frac{\partial r}{\partial y} + 3xH_yr^{-5} \right\}, \\
\frac{\partial B_x}{\partial z} &= \frac{\mu}{4\pi} \left\{ [(-15x^2H_x - 15xyH_y - 15xzH_z)r^{-6} + 3r^{-4}H_x] \frac{\partial r}{\partial z} + 3xH_zr^{-5} \right\}, \\
\frac{\partial B_y}{\partial x} &= \frac{\mu}{4\pi} \left\{ [(-15xyH_x - 15y^2H_y - 15yzH_z)r^{-6} + 3r^{-4}H_y] \frac{\partial r}{\partial x} + 3yH_xr^{-5} \right\}, \\
\frac{\partial B_y}{\partial y} &= \frac{\mu}{4\pi} \left\{ [(-15xyH_x - 15y^2H_y - 15yzH_z)r^{-6} + 3r^{-4}H_y] \frac{\partial r}{\partial y} + (3xH_x + 6yH_y + 3zH_z)r^{-5} \right\}, \\
\frac{\partial B_y}{\partial z} &= \frac{\mu}{4\pi} \left\{ [(-15xyH_x - 15y^2H_y - 15yzH_z)r^{-6} + 3r^{-4}H_y] \frac{\partial r}{\partial z} + 3yH_zr^{-5} \right\}, \\
\frac{\partial B_z}{\partial x} &= \frac{\mu}{4\pi} \left\{ [(-15xzH_x - 15yzH_y - 15z^2H_z)r^{-6} + 3r^{-4}H_z] \frac{\partial r}{\partial x} + 3zH_xr^{-5} \right\}, \\
\frac{\partial B_z}{\partial y} &= \frac{\mu}{4\pi} \left\{ [(-15xzH_x - 15yzH_y - 15z^2H_z)r^{-6} + 3r^{-4}H_z] \frac{\partial r}{\partial y} + 3zH_yr^{-5} \right\}, \\
\frac{\partial B_z}{\partial z} &= \frac{\mu}{4\pi} \left\{ [(-15xzH_x - 15yzH_y - 15z^2H_z)r^{-6} + 3r^{-4}H_z] \frac{\partial r}{\partial z} + (3xH_x + 3yH_y + 6zH_z)r^{-5} \right\}.
\end{aligned} \tag{21}$$

进行无人机导航时, 通常使用的坐标表示方法为 WGS84 系表示, 其位置向量表示为

$$\mathbf{X}_{\text{WGS}}[t] = [\alpha \quad \beta \quad h] = [\pi L/180 \quad \pi \lambda/180 \quad h]. \tag{22}$$

在地心地固坐标系下的磁异常矢量与 $\mathbf{X}_{\text{WGS}}[t]$ 没有直接关系, 因此采用链式法则求取磁异常矢量关于 $\mathbf{X}_{\text{WGS}}[t]$ 的偏导数, 即

$$\frac{\partial (B_x, B_y, B_z)}{\partial (\alpha, \beta, h)} = \left[\frac{\partial (B_x, B_y, B_z)}{\partial (x, y, z)} \cdot \frac{\partial (x, y, z)}{\partial (\alpha, \beta, h)} \right]. \tag{23}$$

磁偶极子坐标系下的位置矢量 $\mathbf{X}_D(t)$ 和 WGS84 坐标系下位置矢量之间的转换关系为

$$\begin{aligned}
x &= (R_N + h) \cos \alpha \cos \beta - x_{\text{mag}}, \\
y &= (R_N + h) \cos \alpha \sin \beta - y_{\text{mag}}, \\
z &= [R_N \cdot (1 - e^2) + h] \sin \alpha - z_{\text{mag}}, \\
R_N &= R_e / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \alpha}.
\end{aligned} \tag{24}$$

$\mathbf{P}_{\text{Dipole}} = [x_{\text{mag}} \quad y_{\text{mag}} \quad z_{\text{mag}}]^T$ 是磁源中心在地心地固坐标系下的坐标位置, 在计算过程中可以忽略. 式 (24) 中, R_N 为卯酉圈曲率半径; R_e 为地球半径, 取值约为 6378.137 km; e 为地球轨道偏心率, 取值约为 0.08181919. 根据式 (24), 求 $\mathbf{X}_D(t)$ 对 $\mathbf{X}_{\text{WGS}}[t]$ 的偏导数, 有

$$\mathbf{H}_X = \frac{\partial (x, y, z)}{\partial (\alpha, \beta, h)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \alpha} & \frac{\partial x}{\partial \beta} & \frac{\partial x}{\partial h} \\ \frac{\partial y}{\partial \alpha} & \frac{\partial y}{\partial \beta} & \frac{\partial y}{\partial h} \\ \frac{\partial z}{\partial \alpha} & \frac{\partial z}{\partial \beta} & \frac{\partial z}{\partial h} \end{bmatrix}. \tag{25}$$

其中的各元素为

$$\begin{aligned}
\frac{\partial x}{\partial \alpha} &= \{R_e[e^2 \sin \alpha \cos \alpha](1 - e^2 \sin^2 \alpha)^{-\frac{3}{2}}\} \cos \alpha \cos \beta - \\
&\quad [R_e / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \alpha} + h] \sin \alpha \cos \beta, \\
\frac{\partial x}{\partial \beta} &= -[R_e / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \alpha} + h] \cos \alpha \sin \beta, \\
\frac{\partial x}{\partial h} &= \cos \alpha \cos \beta, \\
\frac{\partial y}{\partial \alpha} &= \{R_e[e^2 \sin \alpha \cos \alpha](1 - e^2 \sin^2 \alpha)^{-\frac{3}{2}}\} \cos \alpha \cdot \\
&\quad \sin \beta - (R_N + h) \sin \alpha \sin \beta, \\
\frac{\partial y}{\partial \beta} &= (R_N + h) \cos \alpha \cos \beta, \\
\frac{\partial y}{\partial h} &= \cos \alpha \sin \beta, \\
\frac{\partial z}{\partial \alpha} &= [R_e(e^2 \sin \alpha \cos \alpha)(1 - e^2 \sin^2 \alpha)^{-\frac{3}{2}}(1 - e^2)] \cdot \\
&\quad \sin \alpha + [R_N(1 - e^2) + h] \cos \alpha, \\
\frac{\partial z}{\partial \beta} &= 0, \quad \frac{\partial z}{\partial h} = \sin \alpha.
\end{aligned} \tag{26}$$

根据本节推导, 基于磁异常场的地磁/惯性融合导航系统的线性化离散化测量方程为

$$\delta \mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \delta \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k. \tag{27}$$

其中测量矩阵为

$$\mathbf{H}_k = \frac{\partial (B_x, B_y, B_z)}{\partial (\alpha, \beta, h)}. \quad (28)$$

2.2 滤波器设计

使用卡尔曼滤波器进行融合导航的滤波, 执行如下更新流程.

(1) 计算状态转移矩阵和测量矩阵

$$\Phi_{k/k-1} = \mathbf{I} + \mathbf{F}(t)T_s, \quad (29)$$

$$\mathbf{H}_k = \frac{\partial (B_x, B_y, B_z)}{\partial (\alpha, \beta, h)} = \mathbf{H}_B \cdot \mathbf{H}_X. \quad (30)$$

(2) 时间更新

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} &= \Phi_{k/k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1}, \\ \mathbf{P}_{k/k-1} &= \Phi_{k/k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + \Gamma_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \Gamma_{k-1}^T. \end{aligned} \quad (31)$$

(3) 测量更新

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1}, \\ \hat{\mathbf{X}}_k &= \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}), \\ \mathbf{P}_k &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k/k-1}. \end{aligned} \quad (32)$$

3 融合导航方法验证与分析

上述内容对磁异常梯度测量的运动平台导航方

法的原理进行了分析, 并设计了融合导航滤波器, 为验证该方法的可行性, 搭建区域磁场仿真环境对导航系统进行验证.

3.1 磁场环境仿真

3.1.1 磁偶极子场

当测量点到磁源中心位置超过磁源三倍自身尺寸时, 可以将磁源视作磁偶极子, 其磁异常场可以用磁偶极子模型进行描述.

在位置 $\mathbf{P}_1 = (34.108^\circ\text{N}, 108.014^\circ\text{E}, -1000 \text{ m})$ 处放置磁矩为 $\mathbf{M} = [4.55, 2.5, 7.81]^T \times 10^9$ 的磁偶极子以模拟磁源, 其在海拔 100 m 高度处产生的磁场如图 5 所示.

3.1.2 总磁场

在磁异常场上添加变化缓慢的主磁场以模拟天然磁场环境, 根据对 IGRF 地球主磁场模型的仿真分析得到, 在 100 m 高度, 主磁场的变化速度约为 $1 \text{ nT} \cdot \text{km}^{-1}$, 添加后的区域磁场如图 6 所示.

上述模拟磁环境用于验证本文所提出导航方法的可行性. 在上述模拟磁环境中合适位置再加入两个磁异常场, 令磁异常场相互影响, 新加入的磁异常场在原异常场中心的磁场强度均不小于 5 nT, 形成类似于真实应用环境的复杂磁场环境, 如图 7 所示. 新加入的磁异常场中心位置分别为异常场 2: $\mathbf{P}_2 = (34.080^\circ\text{N}, 108.060^\circ\text{E}, -1000 \text{ m})$ 和异常场 3: $\mathbf{P}_3 =$

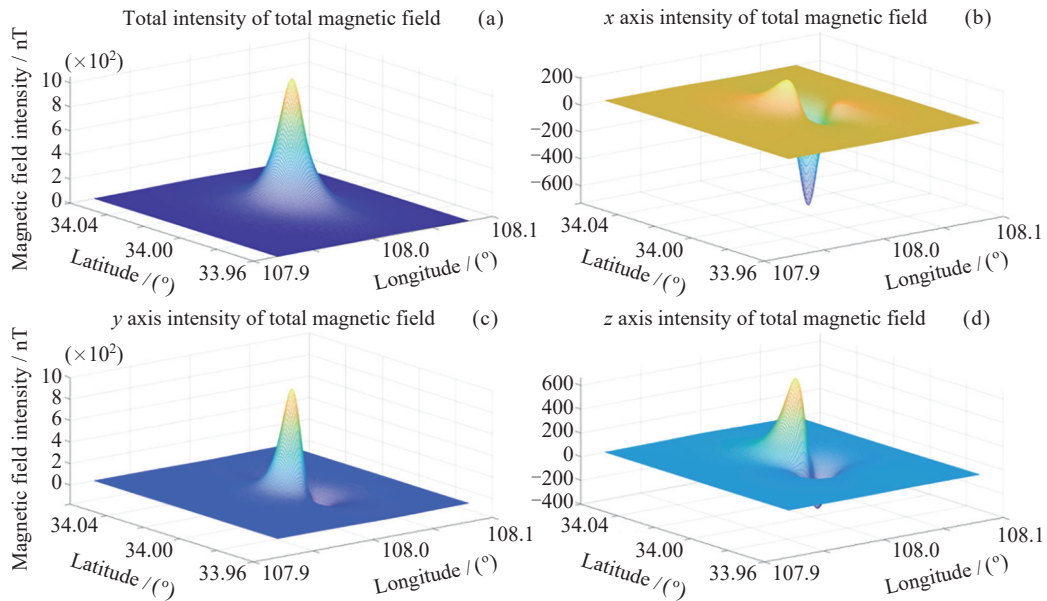


图 5 磁偶极子场

Fig. 5 Magnetic-dipole field

(34.080°N, 107.900°E, -1000 m).

从图 7 中可以看出仿真的总磁场环境中具备明显磁异常特征, 磁异常场的分布梯度满足导航系统仿真需求. 自然界磁场中, 主磁场占比约为 95%, 异常场占比约为 4%, 主磁场的磁场强度较大, 但变化缓慢, 根据对 IGRF 模型进行的仿真分析, 主磁场变化

折合约为 $1 \text{ nT} \cdot \text{km}^{-1}$. 异常场虽然磁场强度较小 (最大幅值在 300 nT 以上), 但是相较于主磁场变化迅速, 且变化速率不固定, 磁异常特征各方向上的变化速度绝对值为 0~120 nT 不等, 特征梯度具有较大的变化范围 (见表 1).

所提出的磁异常信息获取方法和导航方法都以

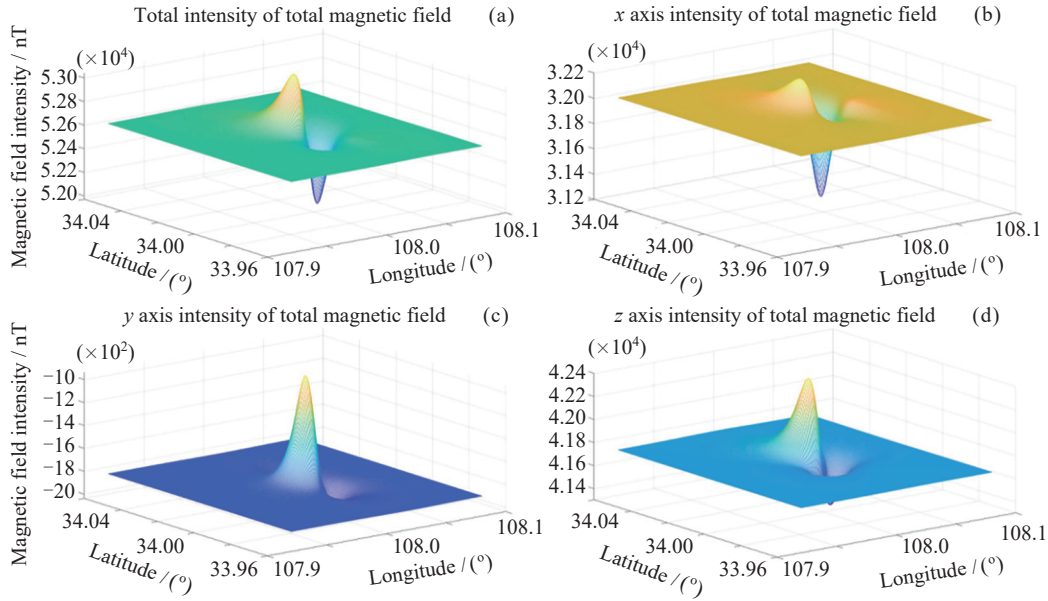


图 6 总磁场 (主磁场+磁异常场)

Fig. 6 Total magnetic field (main magnetic field + magnetic anomaly field)

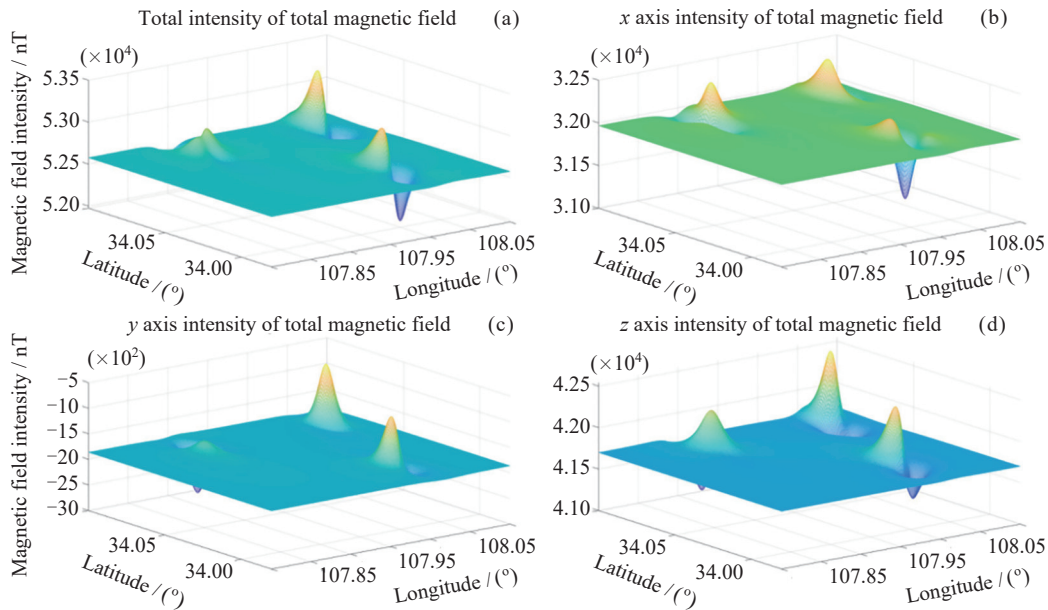


图 7 复杂磁场环境

Fig. 7 Complex magnetic field environment

前后测量信息的差分近似作为磁异常的差分, 因此要求磁异常场的分布梯度大于主磁场的分布梯度. 同时, 磁测噪声的存在也会影响对磁异常特征梯度的分辨效果, 在前后测量位置的磁异常特征梯度应该大于磁测噪声的最大值, 选取的磁测噪声为 1~3 nT (磁强计自身的测量精度可优于 0.5 nT, 考虑到平台磁干扰影响, 设置测量噪声为 1~3 nT). 综合说来, 在本文磁测噪声条件下, 前后测量位置的磁异常特征梯度大于 6 nT 时对自然界中的磁异常特征梯度有较好的分辨效果.

3.2 融合导航仿真分析

3.2.1 导航理论仿真与可行性分析

在仿真环境中设置一条标准运动平台飞行轨迹, 起点为 $P=(34.011^{\circ}\text{N}, 108.014^{\circ}\text{E}, -1000\text{ m})$, 运动平台的加速度为 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 经过 10 s 的加速后做匀速直线运动, 持续 250 s. 设置仿真运动平台为固定翼无人机, 测量基线选取 0.1 m, 磁源的磁矩及位置为已知信息, 分别进行纯惯性导航仿真和融合导航仿真, 其他仿真参数见表 2.

为了从理论层面验证导航方法的可行性, 首先在单磁偶极子的模拟磁环境中进行仿真, 从图 8 中可见, 利用磁异常场信息, 融合导航方法可以有效抑制定位导航结果的发散.

将三维仿真轨迹完整绘制为图 9, 分析得到融合导航系统相较于纯惯性导航系统的位置精度有显著提升. 为分析具体位置精度情况, 计算纯惯导轨迹和融合导航轨迹与标准轨迹在各方向上的位置误差如图 10 所示.

由图 9 和图 10 可知随时间增加, 惯性导航方法的导航误差逐渐发散, 而融合导航方法的误差在前期随惯导增加后, 明显呈现收敛趋势. 结合运动轨迹进行分析, 运动前期平台距离异常场较远, 磁异常梯度过小, 修正作用不明显, 融合导航的精度在运动前期是与惯导相似的, 当进入磁异常场影响范围内时, 地磁导航介入修正惯导的累积误差, 提升了导航精度.

连续进行多次仿真实验以验证融合导航方法的性能及普适性, 其结果列于表 3.

地磁异常场的磁场强度值一般都较小, 因此若要利用该磁场则会对磁测的准确度提出一定要求, 在地磁导航方法的应用中, 一般要求磁测准确度在 1 nT 左右. 为试验本导航方法在大噪声条件下的效果, 在单磁偶极子模拟磁环境中将磁力计各轴的测量误差增加到 3 nT, 仿真结果如图 11 和图 12 所示.

加大磁测噪声后, 融合导航仍然能够有效补偿惯导累积误差, 提供精度较高的导航信息. 同样, 进行多次仿真实验, 各方向误差绝对值均值见表 4 所示.

表 1 某地磁异常场梯度幅值统计

Table 1 Amplitude of the gradient of a certain geomagnetic anomaly field

网格点距/km	ΔT_x 磁异常/(nT·km ⁻¹)		ΔT_y 磁异常/(nT·km ⁻¹)		ΔT_z 磁异常/(nT·km ⁻¹)	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
1	48.3	-71.2	63.6	-40.4	122.3	-68.3
2	43.3	-48.5	44.4	-31.6	81.0	-44.2
3	36.0	-37.0	32.3	-23.0	60.8	-39.0

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

仿真参数	取值
惯导部分参数	陀螺常值零偏: [0.01, 0.015, 0.02] (°)·h ⁻¹ 陀螺随机游走: [0.001, 0.001, 0.001] (°)·Hz ^{-1/2} 加速度常值零偏: [50, 90, 100] μg 加速度随机游走: [1, 1, 1] $\mu\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$
磁场部分参数	磁强计测量误差(每轴): 1 nT 磁强计测量频率: 100 Hz 先验磁矩: $M=[4.55, 2.5, 7.81]^T\times 10^9$ 位置: (34.011°N, 108.014°E, -1000m)

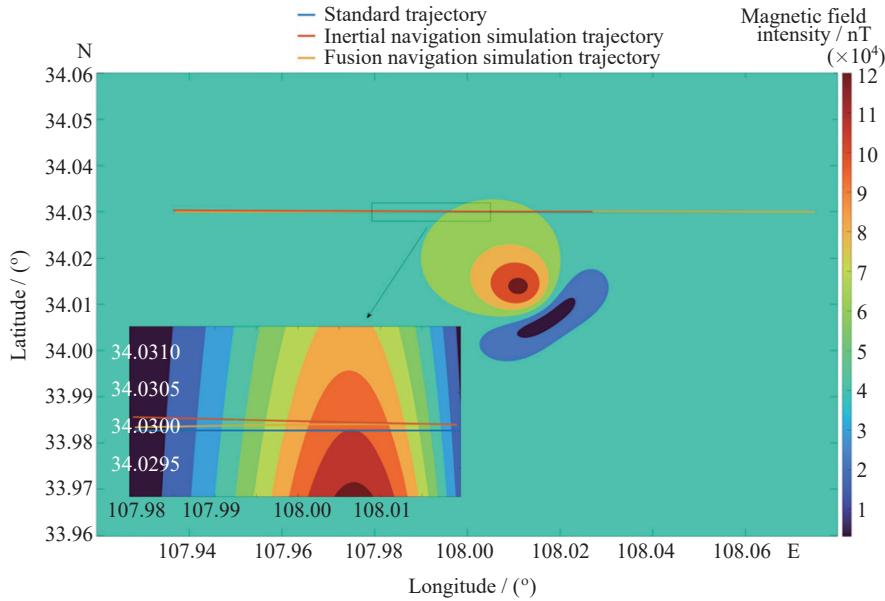


图 8 水平导航算法仿真结果

Fig. 8 Simulation results of horizontal navigation algorithm

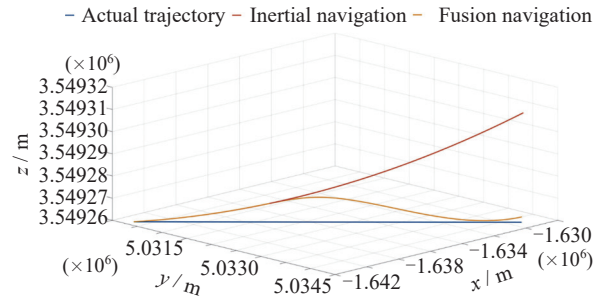


图 9 导航算法仿真结果

Fig. 9 Navigation algorithm simulation results

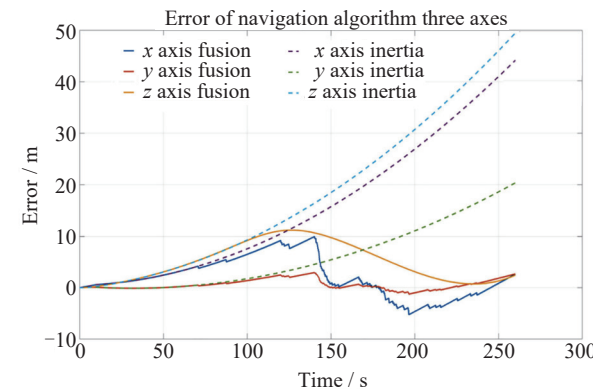


图 10 导航算法仿真误差

Fig. 10 Navigation algorithm simulation error

表 3 多次仿真误差均值

Table 3 Mean error of multiple simulations

仿真 次数	误差绝对值均值/m							
	融合导航				惯性导航			
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	总	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	总
1	3.33	0.80	4.96	3.03	15.47	5.91	17.81	13.06
2	2.60	0.55	5.00	2.72	15.50	5.84	17.93	13.09
3	4.32	1.43	5.14	3.63	15.41	5.68	18.11	13.07

在较大的磁测噪声下, 融合导航的精度在各方向上都有轻微下降, 但总体仍然能够保持较小的误差, 说明融合导航方法有较好的抵抗磁测噪声的能力. 可知在简单磁场环境下的磁异常梯度测量的地磁/惯性融合导航方法具有较好的导航效果, 且在较大磁测噪声条件下仍然能够保持较高的精度.

3.2.2 多异常场复杂环境仿真与分析

保持其他仿真条件不变, 在多个磁异常场复杂磁环境下 (见 图 7) 同样进行多次惯性导航和融合导航的仿真实验, 磁测噪声设置为 1 nT, 仿真结果如 图 13 和 图 14 所示.

可见在复杂磁环境中, 融合导航能够发挥作用, 提升导航精度. 与在单偶极子的模拟磁环境中表现不同的是, 在运动前期, 融合导航的误差与惯性导航误

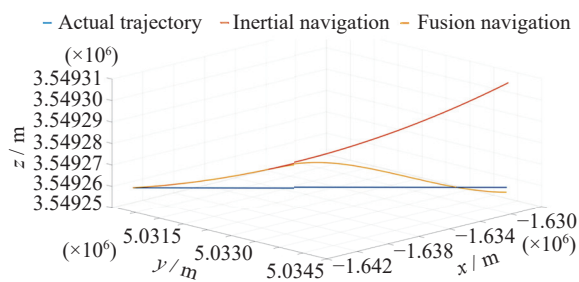


图 11 3 nT 磁测噪声下导航算法仿真结果

Fig. 11 Simulation results of navigation algorithm under 3 nT magnetic measurement noise

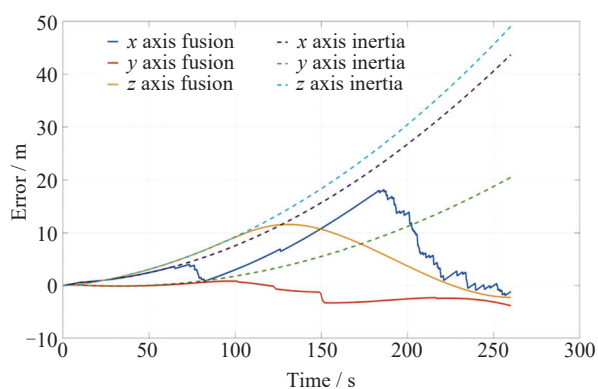


图 12 3 nT 磁测噪声下导航仿真误差

Fig. 12 Navigation simulation error under 3 nT magnetic measurement noise

差没有关联性, 出现较大的波动, 并且在导航全程给出的导航轨迹不平滑. 这是因为在复杂磁环境中, 磁测获取到的磁信号并非全部来源于所处的磁异常场, 而是受到其他磁异常场的干扰, 导致地磁导航的位置改变量与实际不符, 出现较大偏差. 而随着平台接近磁异常场中心, 磁测信号中来源于该磁异常场的比例增大, 地磁导航结果准确性增强, 提供了有效的修正惯导误差的效果, 提升了导航方法的精度.

进行多次仿真实验以验证在复杂磁环境下融合导航方法的性能, 误差结果在表 5 中给出. 相较于在单磁偶极子模拟磁场中, 其精度有微弱降低, 但在惯性导航方法的基础上仍然表现出较好的导航效果, 说明融合导航方法能够在复杂磁环境中正常工作.

将磁测误差增加到 3 nT 后, 继续进行仿真以分析复杂磁环境中受较大磁测噪声影响的导航算法的效果, 仿真结果如图 15 和图 16 所示.

在运动前期, 由于磁环境本身较复杂, 磁测噪声

表 4 3 nT 磁测噪声下多次仿真误差均值
Table 4 Mean error of multiple simulations under 3 nT magnetic measurement noise

仿真次数	误差绝对值均值 / m							
	融合导航				惯性导航			
	x	y	z	总	x	y	z	总
1	5.45	1.47	5.93	4.28	15.54	5.89	17.87	13.10
2	5.95	1.84	5.70	4.49	15.33	5.83	17.89	13.02
3	5.52	1.43	5.24	4.06	15.37	5.98	17.67	13.01

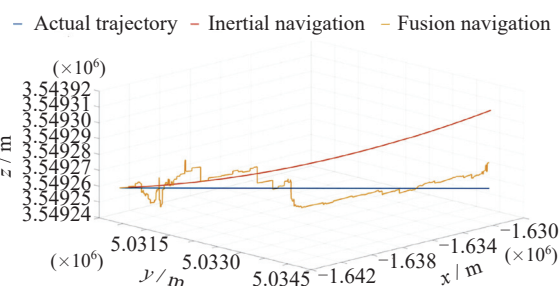


图 13 复杂磁环境中导航算法仿真结果

Fig. 13 Simulation results of navigation algorithms in a complex magnetic environment

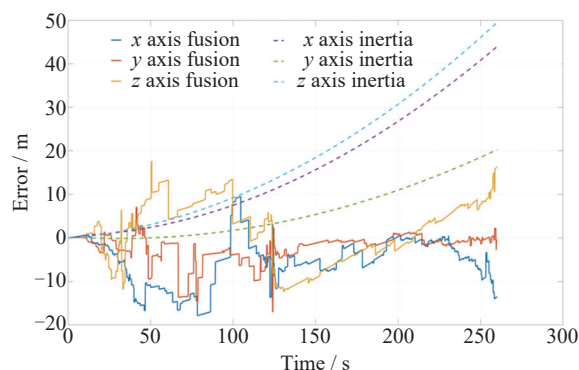


图 14 复杂磁环境中导航仿真误差

Fig. 14 Navigation simulation errors in a complex magnetic environment

增大到 3 nT 后获取到的异常场信息无法应用于导航, 融合导航算法中地磁导航部分几乎不介入对惯导的修正; 运动平台接近磁异常场中心后, 融合导航算法发挥作用, 提供有效的导航信息, 提升了导航定位精度.

同样, 保持仿真条件不变, 进行多次仿真实验, 误差结果在表 6 中给出. 磁测误差增大后, 融合导航算

表 5 复杂磁环境下多次仿真误差均值
Table 5 Mean error of multiple simulation errors in a complex magnetic environment

仿真次数	误差绝对值均值/m							
	融合导航				惯性导航			
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	总	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	总
1	5.94	2.57	5.88	4.80	15.39	5.88	17.81	13.03
2	5.95	2.66	5.88	4.83	15.49	5.79	17.99	13.09
3	5.47	2.97	5.93	4.79	15.54	5.85	17.92	13.10

法在复杂磁场中仍能正常工作, 对惯性导航的累积误差进行有效修正, 提升导航定位的精度.

综合上述仿真实验, 说明本文提出的磁异常梯度测量的地磁/惯性融合导航方法对三轴误差抑制效果良好, 能够在较长时间内保持较高的导航精度. 在单偶极子的模拟磁环境的三次仿真中, 纯惯性导航方法的误差均值都不小于 13 m, 添加地磁导航形成融合导航系统后, 误差均值减小到 3.7 m 以内. 在相同测试条件下基于磁异常梯度测量的地磁/惯性融合导航系统相较于纯惯性导航系统导航精度平均提升约 76.06%. 将磁测误差增大到 3 nT 后, 融合导航精度相较于惯性导航精度提升约 68.00%, 仍然能够保持较好性能.

而在复杂磁环境中, 磁测误差在 1 nT 时, 本方法相较于惯性导航的提升约为 63.16%; 磁测误差在 3 nT 时, 相较于惯性导航的提升约为 55.99%. 说明在低磁测噪声条件下, 融合导航方法能够保持较高的导航精度, 而大磁测噪声条件下, 融合导航方法受到较大影响, 但仍然优于惯性导航. 总体说来, 融合导航方法能够在复杂的磁环境中有效提升导航精度.

从仿真结果来看, 融合导航系统的位置误差较小且具备普适性, 对惯性导航系统的精度发散抑制作用明显, 说明本文所提出的利用磁异常场梯度信息修正惯导累积误差的地磁/惯性融合导航可以有效利用磁梯度信息, 抑制惯导累积误差和导航系统精度发散, 有效提升运动平台自主导航系统的精度.

4 结论

对测量总磁场的构成和特性进行分析, 提出利用差分信息从测量总磁场中获取磁异常场估计信息的方法, 经过准确率分析, 该方法能够在磁异常场的非

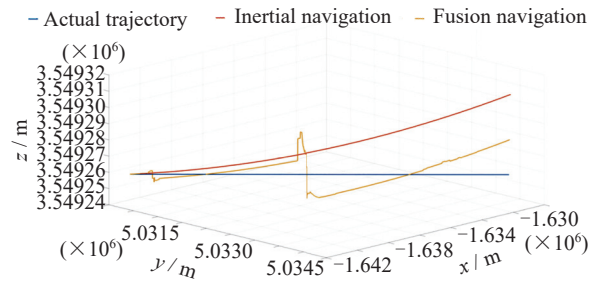


图 15 3 nT 噪声复杂磁环境导航算法仿真结果
Fig. 15 Simulation results of navigation algorithm in a complex magnetic environment with 3 nT noise

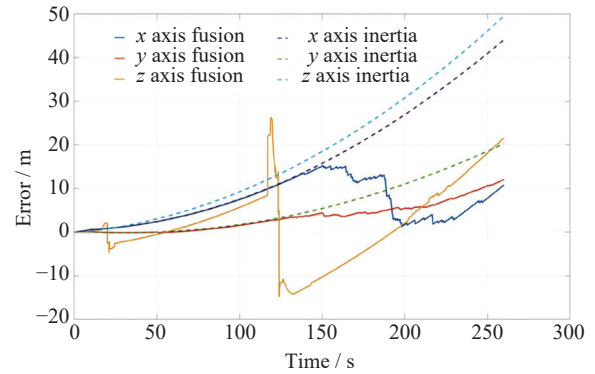


图 16 3 nT 噪声复杂磁环境导航仿真误差
Fig. 16 Simulation error of navigation in a complex magnetic environment with 3 nT noise

表 6 3 nT 噪声复杂环境多次仿真误差均值
Table 6 Mean error value of multiple simulations in a complex environment with 3 nT noise

仿真次数	误差绝对值均值/m							
	融合导航				惯性导航			
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	总	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	总
1	6.52	3.39	6.49	5.47	15.47	5.90	17.82	13.06
2	6.67	3.40	7.71	5.93	15.38	5.70	18.05	13.04
3	6.33	3.33	7.78	5.81	15.34	5.85	17.84	13.01

正负交界区域提供较准确的磁异常场估计值. 根据磁异常场的磁偶极子特性推导导航系统测量矩阵表达式, 设计了测量量为磁异常场梯度信息的地磁/惯性融合导航系统. 通过搭建磁场环境进行纯惯性导航方法和地磁/惯性融合导航方法的仿真, 证明融合导航系统能够利用地磁导航方法有效补偿惯性导航的累积误差, 具有较高的精度, 同时所需地磁

场先验信息少且计算量小.

参考文献

- [1] KOU Yimin. Research of Key Technologies in Geomagnetic Navigation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010
- [2] WANG C, LIU R, LI B. Autonomous navigation algorithm based on celestial and geomagnetism[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010, **18**(4): 429-433
- [3] CARLETTA S, TEOFILATTO P, FARISSI M S. A magnetometer-only attitude determination strategy for small satellites: design of the algorithm and hardware-in-the-loop testing[J]. *Aerospace*, 2020, **7**(1): 3
- [4] SABZEVARI S, ARVAN M R, VALI A R, *et al.* Symmetry preserving nonlinear observer for attitude estimation with magnetometer only[J]. *ISA Transactions*, 2020, **102**: 314-324
- [5] CUI Feng. Research on Geomagnetic Navigation Method Based on Measurement Difference and Model Reconstruction & Compensation[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2021
- [6] GAO Dong, ZHU Minghui, HAN Peng. A geomagnetic/inertial depth fusion navigation method[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2022, **30**(4): 437-444
- [7] ANDREI C, HEVER M. Q-learning model covariance adaptation of rao-blackwellized particle filtering in airborne geomagnetic navigation[C]//Proceedings of 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. Monterey: IEEE, 2023: 143-149
- [8] CHEN Z, LIU K J, ZHANG Q, *et al.* Geomagnetic vector pattern recognition navigation method based on probabilistic neural network[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, **61**: 5909608
- [9] WANG Lihui, XU Ninghui, LIU Qingya. A PSO geomagnetic matching algorithm based on particle constraint[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2020, **28**(6): 755-760
- [10] CHEN Bin, GU Zuowen, GAO Jintian, *et al.* Analyses of geomagnetic field and its secular variation over China for 2005.0 epoch using spherical cap harmonic method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, **54**(3): 771-779 (陈斌, 顾左文, 高金田, 等. 2005.0 年代中国地区地磁场及其长期变化球冠谐和分析 [J]. *地球物理学报*, 2011, **54**(3): 771-779)
- [11] ZHENG Mengling, SONG Xinda, ZHOU Binqun, *et al.* Research on the adaptive parameter calibration method of SERF atomic magnetometer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, **43**(9): 1-9
- [12] ZHU Zhanlong, SHAN Youdong, YANG Yi, *et al.* INS/GNS integrated method based on innovation orthogonality adaptive Kalman filter[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2015, **23**(1): 66-70
- [13] GAO Yu. Invert the Main Magnetic Field by Combining Swarm and CSES Satellite Data[D]. Wuhan: Wuhan University, 2022 (高瑀. 联合 Swarm 和张衡一号卫星磁测数据建立地球主磁场模型 [D]. 武汉: 武汉大学, 2022)
- [14] GUO Caifa, ZHANG Lijun, CAI Hong. Analysis of geomagnetic navigation accuracy under magnetic storms[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2011, **31**(3): 372-377 (郭才发, 张力军, 蔡洪. 磁暴期间的地磁导航精度分析 [J]. *空间科学学报*, 2011, **31**(3): 372-377)
- [15] ZHANG Tao, GAO Dong, ZHENG Jianhua. Simplified calculation method of geomagnetic field model[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, **38**(1): 88-93 (张涛, 高东, 郑建华. 地磁场模型简化计算方法 [J]. *空间科学学报*, 2018, **38**(1): 88-93)
- [16] LIU Ying, WU Meiping, HU Xiaoping, *et al.* Contour constraint based geomagnetic matching method[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2007, **27**(6): 505-511 (刘颖, 吴美平, 胡小平, 等. 基于等值线约束的地磁匹配方法 [J]. *空间科学学报*, 2007, **27**(6): 505-511)
- [17] HAO Boqiang. Design of Magnetic Positioning System Based on Gradient Tensor[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2022
- [18] WAN Chengbiao, PAN Mengchun, ZHANG Qi, *et al.* Magnetic object localization with eigenvalue and eigenvector of tensor[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2017, **47**(2): 655-660
- [19] ZHANG Lun. Research on Target Positioning Technology Based on Magnetic Gradient Tensor[D]. Taiyuan: North University of China, 2022
- [20] YAN Gongmin, WENG Jun. Strapdown Inertial Navigation Algorithm and Integrated Navigation Principle[M]. Xi'an: Northwest University of Technology Press, 2019

作者简介



梁宇潇 男, 1999 年 5 月出生于重庆市, 现为中国科学院大学国家空间科学中心硕士研究生. 主要研究方向为飞行器自主导航与控制研究.
E-mail: liangyuxiao21@mails.ucas.ac.cn



高东(通信作者) 男, 现为中国科学院大学国家空间科学中心副研究员, 硕士生导师. 主要研究方向为飞行器自主导航与控制研究.
E-mail: gaodong@nssc.ac.cn