

地磁匹配导航半实物仿真方案设计及关键技术分析

吕志峰¹, 孙渊², 张金生¹, 王仕成¹, 李婷¹

(1. 第二炮兵工程大学, 西安 710025; 2. 二炮装备研究院, 北京 100085)

摘要: 以地磁匹配导航原理为理论依据, 设计了半实物仿真系统的总体方案。在半实物仿真模型选取和结构组成的基础上, 系统分析地磁场数据库仿真、载体干扰磁场补偿、地磁场环境仿真和地磁匹配导航算法这4种关键技术并提出了相应的工程解决方案, 为实现地磁匹配导航半实物仿真提供一种参考。

关键词: 地磁匹配导航; 半实物仿真; 地磁场数据库; 干扰磁场补偿; 地磁场环境仿真; 匹配算法

中图分类号: V249.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)02-0059-06

Design of a Hardware-in-the-Loop Simulation Scheme for Geomagnetic Matching Navigation and Its Key Technologies

LÜ Zhi-feng¹, SUN Yuan², ZHANG Jin-sheng¹, WANG Shi-cheng¹, LI Ting¹

(1. The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;

2. Equipment Research Institute of The Second Artillery, Beijing 100085, China)

Abstract: According to the principle of geomagnetic matching navigation, an overall scheme of hardware-in-the-loop simulation is proposed. Based on the model selection and structure of hardware-in-the-loop simulation, the key technologies of geomagnetic database simulation, carrier interference magnetic field compensation, geomagnetic environment simulation and geomagnetic matching navigation algorithm, are analyzed systematically, and the corresponding solutions are put forward, which provides a reference for the hardware-in-the-loop simulation.

Key words: geomagnetic matching navigation; hardware-in-the-loop simulation; geomagnetic database; interference magnetic field compensation; geomagnetic environment simulation; matching algorithm

0 引言

半实物仿真作为仿真技术的一个重要分支, 已经广泛应用于自动化工程、航空航天、动力系统、制造业、机器人设计等领域^[1-3]。半实物仿真可以通过构建目标/环境模拟器逼真地生成真实条件下的目标/环境场景进行仿真试验, 而且还可以将系统中某些非线性较高的关键部件实物引入仿真回路, 这样就避免了全数字仿真中由于非线性部件建立数学模型不准确所带入的误差, 从而可以大大提高仿真的可信度。同时, 通过半实物仿真试验, 还可以缩短产品研制周期、控制研制成本、保障研制安全^[4]。

自2004年我国一些学者提出并论证了可以将地

磁匹配作为一种新的导航方式^[5]以来, 短短10年的时间, 地磁匹配导航技术已成为国内科研机构和学者的研究热点^[6]。目前, 地磁匹配导航的研究以理论研究和全数字仿真为主, 其诸多研究成果如何在工程实际中综合应用, 已成为一个迫在眉睫的问题。据美国大西洋导弹测试基地的统计, “美国军方90%的武器系统的鉴定、评估数据来自于半实物仿真的结果”, 我国的航天、航空部门也规定“未经过半实物仿真的产品不能参与发射或飞行测试”^[7]。未来能否将地磁匹配导航技术成功应用于工程实际, 半实物仿真试验评估是其中的一个关键性的制约因素。本文从地磁匹配导航的工程化需求出发, 设计了一种地磁匹配导航半实物仿真总体方案, 系统分析了地磁匹配导航半实物仿真的关键技术, 并提出了相应的解决方案, 为实现地磁匹配导航半实物仿真提供一种参考。

1 地磁匹配导航的原理

地球表面的磁场在不同地区是不同的, 这种空间

各异性构成了不同地理位置上的一种典型特征,并且地磁场包含地磁总场、地磁三分量、磁倾角、磁偏角及地磁梯度等丰富的特征参数^[8],这些特征参数为地磁匹配导航提供丰富的匹配信息,从而获得精确的导航信息。

地磁匹配导航,就是把预先规划好的航迹上某些点的地磁场特征量绘制成地磁基准图(或称参考图),存储在载体导航计算机中,当载体飞越匹配区时,由地磁场测量仪器实时测量出飞越点的地磁场特征量,并构成实时测量序列,与导航计算机中的地磁基准图进行匹配,即通过一定的地磁匹配算法估算出载体的坐标位置,从而修正惯导误差,以达到精确导航的目的^[5]。这些地磁场特征量的参考值可以是根据地磁场模型计算出的理论值,也可以是预先实测的地磁场数据,其原理如图 1 所示。

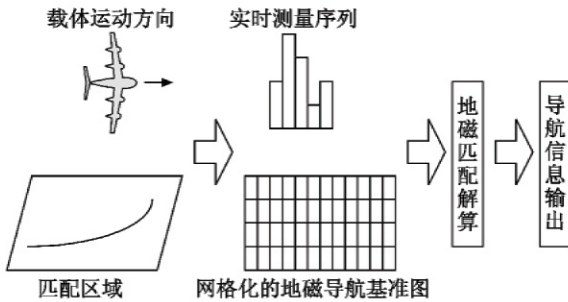


图 1 地磁匹配导航原理图

Fig. 1 The principle of geomagnetic matching navigation

2 地磁匹配导航半实物仿真总体方案

匹配导航的半实物仿真,就是在地磁匹配地磁导航仿真回路中构建地磁场模拟器,以模拟载体飞越区域上空的磁场环境,并将地磁匹配导航中的关键部件——磁场测量仪器引入仿真回路中,进而通过半实物仿真试验,开展诸如载体磁场测量仪器的选型与配置、载体干扰磁场分析与补偿、地磁匹配算法性能分析等相关内容的研究。

2.1 地磁匹配导航半实物仿真的工作原理及结构组成

对图 1 所示的地磁匹配导航进行半实物仿真,重点需要对载体飞越匹配区上空时地磁场变化的实时测量过程进行仿真。由于在实验室环境下无法实现载体的真实运动,而磁场测量仪器安装于载体上随载体一起运动,故在实验室内模拟磁传感器所经历的地磁场环境即可,这可以通过地磁场模拟器实现。地磁场模拟器主要是复现磁场测量仪器与地磁场的相对运动,即将磁场测量仪器在地磁场中的运动转换为地磁场相对于磁场测量仪器的运动。图 2 所示为中国科学计量

研究院设计的三维地磁场模拟器,其由 3 组亥姆霍兹线圈组成,通过在 3 组线圈中通入电流来模拟地磁场的 3 个分量。

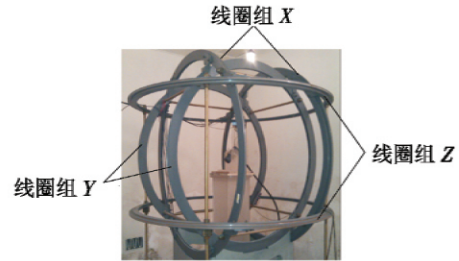


图 2 三维地磁场模拟器

Fig. 2 Three-dimensional geomagnetic simulator

将磁场测量仪器与载体模型固连以模拟实际的载体磁测环境,根据载体的飞行速度、飞行方向、初始位置等飞行参数以及磁传感器的采样频率,从存储在仿真计算机中的地磁场数据库,即基准图中确定航迹上需要被模拟的点的磁场值,然后,根据地磁场模拟装置的输入电流与输出磁场的关系,计算出产生被模拟地磁场所需的电流大小,利用时序控制其产生相应的磁场,使置于地磁场模拟器内部的磁场测量仪器敏感到,最后,将磁场测量仪器测得的“实时图”与地磁基准图通过仿真计算机内部的匹配算法模块进行匹配解算,输出定位结果,这就是地磁匹配导航半实物仿真的工作原理。由此可见,模拟载体飞行航迹上地磁场变化的过程实质就是模拟地磁匹配导航中实时图的获取过程。

这样,由地磁场数据库、地磁场模拟器、磁场测量仪器、仿真计算机、地磁匹配解算模块和载体模型就构成了地磁匹配导航半实物仿真的主要内容。典型的地磁匹配导航半实物仿真结构组成如图 3 所示。

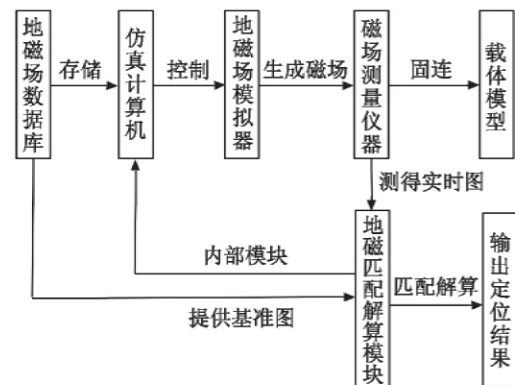


图 3 地磁匹配导航半实物仿真结构组成示意图

Fig. 3 The composition of hardware-in-the-loop simulation system for geomagnetic matching navigation

2.2 地磁匹配导航半实物仿真中的模型需求

出于经济、安全及可能性方面的考虑,需要借助于不同的模型对半实物仿真对象进行区别仿真,系统仿真中所用的模型主要分为物理模型和数学模型两大类^[4]。

针对地磁匹配导航的半实物仿真主要是在实验室条件下对地磁匹配的过程进行模拟仿真,由地磁匹配导航半实物仿真的原理可知,需要建立地磁场数据库模型和地磁场环境模型。

地磁场数据库模型是地磁匹配导航半实物仿真的基础,为地磁场模拟器提供数据驱动。地磁场数据库模型是空间位置与地磁场值的对应关系,可以采用预先计算并存储于实时仿真计算机中的数学模型加以实现。

地磁场环境模型是提高地磁匹配导航半实物仿真逼真度的关键因素,为磁场测量仪器提供较为真实的地磁场背景。磁场测量仪器敏感地磁场环境模型产生的时序变化磁场,完成地磁场实时测量,为地磁匹配解算模块提供用于匹配解算的实时测量数据。地磁场环境模型可以通过采用电流与磁场的物理关系建立相应的物理模型加以实现^[9],配合载体模型或载体上的设备模型,实现一种更为真实的载体磁测环境。

3 地磁匹配导航半实物仿真关键技术分析

基于上述认识,本文认为在地磁匹配导航半实物仿真中应着重解决地磁场数据库源数据获取技术、载体干扰磁场补偿技术、地磁场环境仿真技术和地磁匹配算法方面的问题。

3.1 地磁场数据库源数据获取技术

高精度、高分辨率的地磁场数据库源数据的获取是地磁场环境仿真技术的基础。

地磁场矢量在地理坐标系下可以分解为7个特征量,分别为北向强度分量 X ,东向强度分量 Y ,垂直强度分量 Z ,水平强度分量 H ,总磁场强度 F ,磁倾角 I 和磁偏角 D ,如图4所示,还有梯度、梯度张量等多个衍生特征量。

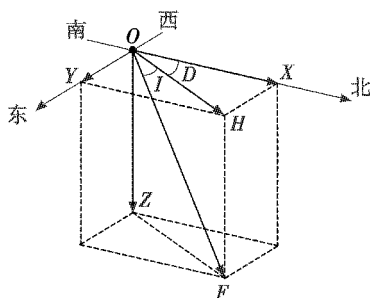


图4 地磁要素示意图

Fig.4 Elements of the geomagnetic field

由于各特征量自身随时间变化程度不同,以及其受地磁场测量仪器和测量环境的影响不同,并非所有的特征量都适用于地磁匹配导航。最优特征量的选取准则表明^[10],总磁场强度 F 是最优匹配特征量,它在空间上变化剧烈,能够提供实现精确定位导航所需要

的信息量,测量精度高,工程实现性好,利用三轴磁力仪可望获得载体干扰磁场的高精度补偿^[11],因此在工程实际中,总磁场强度 F 数据库的获取尤为重要。

地磁场数据库中的基础数据来源有两种:一是利用地磁场模型解算预选区域的地磁场数据;二是对预选区域的地磁场进行实际测量。目前常用的地磁场模型有IGRF、WMM以及EMM等^[8,12],通过对模型涵盖区域内的任意位置的地磁场进行解算,从而获得预选区域的地磁场数据,其精度和分辨率较低,而地磁匹配导航算法的精度、可靠性、抗干扰能力、对地磁场环境的适应能力等性能指标都需要开展大量的仿真试验进行分析和验证,因此,需要在半实物仿真中尽可能多地模拟具有不同空间分布特征的地磁场环境,而利用模型获取大量的地磁场数据是最有可能、最为便捷的途径^[13]。通过对载体经过的实际飞行区域进行地磁场的实际测量,利用所得到的高精度、大密度的离散测量点地磁场数据,采用克里格法、径向基函数法等插值方法进行插值^[14],可以获得精度和分辨率更高的地磁场数据,从而通过具有更高可信度的半实物仿真试验确定实际飞行中该区域的匹配策略和航迹规划。

3.2 干扰磁场补偿技术

地磁匹配导航能否实现高精度定位,其中一个重要方面取决于能否在载体磁场干扰下实现地磁场的实时精确测量。载体结构组成中的金属壳体、电子装置、电控设备、随动部件、发动机等,均在其周围空间产生极其复杂的干扰磁场,这些干扰磁场会叠加在地磁场信号上,严重影响地磁场的高精度测量。如何从磁测结果中将干扰磁场剥离出去,还原出真实的地磁场是地磁匹配导航半实物仿真研究中的一个关键问题。

载体干扰磁场按其特性可以分为固定磁场、感应磁场、随机磁场等^[11]。固定磁场由载体本身的铁磁性物质的剩磁产生,其在短时间内不随时间的变化而变化;感应磁场由载体的软磁性材料被地磁场磁化而产生,其大小与引起它的外加磁场成正比;随机磁场与载体内部的电流回路、电子设备等产生的漏磁和航行中载体切割磁力线而产生的涡流磁场相关,其大部分为高频磁场,可以通过滤波或对干扰源进行屏蔽等方法加以消除,且涡流磁场本身就比较小,故在考虑载体干扰磁场中主要需要分析固定磁场和感应磁场造成的干扰。

针对载体干扰磁场补偿方法,一般有两种^[11,15]:一是采用消磁线圈对载体进行消磁的方法;二是建立载体干扰磁场模型,利用模型来修正磁测数据中的干扰磁场成分。前一种方法称为“硬补偿”,采用的是物理消磁方法,缺点是消磁线圈是对干扰磁场的总体特征

进行补偿,无法做到对磁测仪器位置点处的精确补偿,且消磁线圈不易在载体上安装;后一种方法称为“软补偿”,通过建立精确的载体干扰磁场补偿模型,可以计算载体上任一点处的干扰磁场,然后进行补偿计算,工程上容易实现。

目前,建立补偿模型的方法主要有自差补偿法、椭圆拟合法、无迹 Kalman 滤波(UKF)法等^[16-18]。自差补偿法计算简单,在航海航空领域得到广泛应用,但只是对航向角进行补偿,不能对地磁场的矢量信息进行补偿,且其补偿精度低,不能满足高精度的地磁匹配导航;椭圆拟合法利用测量值拟合出一个椭圆,根据椭圆的中心点、长轴和短轴这些参数与载体磁场系数之间的关系来获得载体磁场各参数,这种算法比较复杂,限制了其在实际中的应用;UKF 虽然可以对载体干扰磁场进行实时补偿,但是如果初始参数选择不当,会造成滤波发散。可见,现阶段对载体干扰磁场的补偿模型方法还有待进一步研究。通过在半实物仿真系统中引入等比例缩小的载体模型,可以对干扰磁场补偿模型进行有效的验证和评估。

3.3 地磁场环境仿真技术

载体实际飞行过程中,其航迹上的地磁场是不断变化的,如何在室内条件下对载体航迹上变化的地磁场进行仿真,是地磁匹配导航半实物仿真研究的主要内容。

地磁场是一个弱磁场,建筑物内含有的磁性物质会对周围空间的地磁场产生干扰,而且实验室内的各种电器设备自身的磁性物质以及加电工作时的激励电流均能产生干扰磁场,这些因素都会干扰磁场模拟装置产生的均匀磁场。因此,需要采用可行的方法将磁场模拟装置周围空间的磁场屏蔽掉,形成一个无磁的环境,建立零磁空间是一个较为可行的解决方案。零磁空间的建立有两种方法^[19]:一是在磁场模拟装置外再建立一个更大的磁场产生装置,通过产生与周围磁场方向相反、大小相等的磁场来动态补偿环境磁场,如图 5 所示,外围的三维亥姆霍兹线圈用于动态补偿环境磁场;二是采用高磁导率材料建立一个磁屏蔽空间,利用高磁导率材料外壳减小外部低频磁场对内部空间的影响,如图 6 所示,由 5 层坡莫合金建立的磁屏蔽筒以屏蔽外界磁场的干扰。前一种方法需要两台磁场测量仪器,一台用于测量环境磁场的变化以得到磁场变化值,进而进行动态补偿,另一台用于测量磁场模拟器产生的磁场,且必须保证两台磁测仪器所处的背景磁场相同,工程实现比较复杂;后一种方法通过硬件材料进行物理隔离,虽然无法做到绝对零磁空间,但可以把磁屏蔽空间中的剩磁作为磁场测量仪器的零漂予以考

虑,工程实现较为容易。

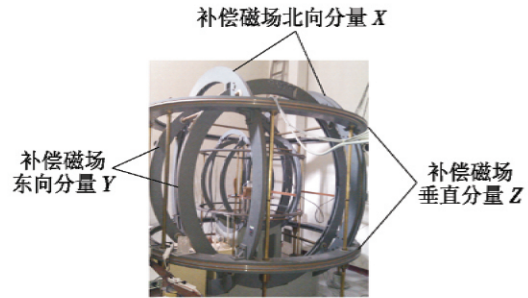


图 5 外围线圈动态补偿环境磁场

Fig. 5 Environmental magnetic field compensated by outer coil

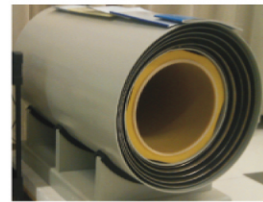


图 6 坡莫合金构建的磁屏蔽筒

Fig. 6 Geomagnetic shielding canister made of by permalloy

对地磁场环境进行仿真,主要是用物理模拟的方法产生满足要求的磁场。从电磁学理论中的毕奥-萨法尔定律可知,导线中的电流会在导线周围空间产生磁场,磁场方向与电流方向满足右手定则。由此,可以考虑采用通电线圈的方法产生磁场,磁场的方向和大小由线圈中电流的方向和大小决定。考虑到地磁场在较小范围内是一个均匀场,仿真中利用螺线管线圈或亥姆霍兹线圈可以产生均匀磁场的特点,通过设计线圈的半径来控制均匀磁场的范围。考虑到磁场仿真的精度,作为能量驱动的电流源,其调节控制精度至关重要,现阶段,电流源的调节精度能达到 μA 级,且稳定度高^[20],通过使用高精度、高稳定度的电流源来实现高精度的磁场仿真。

地磁场具有空间各异性,地磁匹配的定位精度与所在区域的地磁场特性紧密相关,在某些区域并不适合进行地磁匹配导航,即地磁匹配只能在特定区域内进行。所以为了保证地磁匹配精度,可以把标准差、粗糙度、嫡和相关距离等概念应用到数字地磁图,作为度量地磁图特征的参数,根据这些参数对预选区域进行评价,从而选出若干个一定大小、空间连续分布的匹配区,使得地磁场信息量在这些区域内相对显著,更易实现地磁匹配^[21-22]。在预选区域内选出一系列匹配区后,还需要在基准图和匹配区共同构成的搜索空间内,根据粒子群算法、量子遗传算法等智能优化算法找出一条或者若干条能够完成飞行任务、且满足威胁规避和飞行器机动性能约束等条件的最优航线,即航迹规划^[23-24]。最后,根据生成磁场与线圈电流之间的

数学关系,计算出航迹上的磁场值所对应的电流值,再将电流通入线圈产生对应的磁场,这样就可以模拟载体飞行航迹上的地磁场环境。

3.4 地磁匹配算法

地磁匹配最终的目的是要实现导航定位,因此,地磁匹配算法是地磁匹配导航的核心技术,算法的优劣对导航定位的精度、可靠性具有举足轻重的作用。

现阶段对匹配算法的研究较多,基本上是地形匹配导航技术的移植,采用的算法主要有 ICP(ICCP) 和 MAGCOM 两种^[5]。前一种方法基于几何学原理,对最近点进行迭代运算,用最小方差估计的方法,通过计算测量点与真实位置点之间的刚性变换(包括旋转和平移),经过多次迭代,使得两弧之间的量测距离不断减小,从而得到最优估计航迹,但是该算法实现的是均方误差指标局部最小,若初始偏差太大,最近点的计算很容易落入目标函数的极小值点,导致匹配结果不理想,且算法的抗干扰能力差,这成为限制该算法在地磁匹配工程中应用的瓶颈^[25-26];后一种方法基于相关分析原理,利用航迹曲线与数字地磁图进行配准,由于算法采用全局搜索,因而理论上可以得到全局最优解,但是如果搜索区域太大会影响算法的实时性,且由于该算法限制航迹形状与 INS 指示航迹平行^[27],这就要求惯导的航向测量误差要尽量小,对长时间飞行的载体的惯导系统提出了更高的要求。

由于地磁场具有多个匹配特征量的特点,选用多个地磁场特征量,以多目标最优问题来求解地磁场的匹配定位,可以有效地减少全局匹配定位误差,提高算法的抗干扰能力^[28];对于单一匹配算法的缺陷,还可以采取组合匹配算法实现算法之间的互补,如 MAGCOM 和 ICCP 组合匹配、ICP 和 Kalman 滤波相结合的方法等^[29-30]。

4 结束语

本文从地磁匹配导航的工程化需求出发,提出了一种地磁匹配导航半实物仿真的总体设计方案,对半实物仿真系统中的4项关键技术进行了分析研究,并结合工程实际提出了相应的解决方案。随着地磁学的不断发展、载体干扰磁场补偿技术的不断提高、磁场环境仿真技术的不断完善、匹配算法的不断改进和创新,地磁匹配导航一定能够在未来的导航应用中发挥其独特的优越性。

参考文献

- [1] ISERMANN R, SCHAFFNIT J, SINSEL S. Hardware-in-the-loop simulation for the design and testing of engine-

control systems[J]. Control Engineering Practice, 1999, 7(5):643-653.

- [2] WILLIAMSON W R, ABDEL-HAFEZ M F, RHEE I, et al. An instrumentation system applied to formation flight[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(1):75-85.
- [3] STOEPPLER G, MENZEL T, DOUGLAS S. Hardware-in-the-loop simulation of machine tools and manufacturing systems[J]. Computing & Control Engineering Journal, 2005, 16(1):10-15.
- [4] 单家元,孟秀云,丁艳. 半实物仿真[M]. 北京:国防工业出版社,2008. (SHAN J Y, MENG X Y, DING Y. Hardware-in-the-loop simulation[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2008.)
- [5] 李素敏,张万清. 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. (LI S M, ZHANG W Q. Study on the application of geomagnetic field contour in matching guidance[J]. Guidance & Fuze, 2004, 25(3):19-21.)
- [6] 郭才发,胡正东,张士峰,等. 地磁导航综述[J]. 宇航学报,2009,30(4):1314-1319,1389. (GUO C F, HU Z D, ZHANG S F, et al. A survey of geomagnetic navigation[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(4):1314-1319,1389.)
- [7] 李华. 激光制导信息场仿真关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2010. (LI H. Key techniques research on laser guidance information fields simulation[D]. Changsha:National University of Defense Technology, 2010.)
- [8] MAUS S, MCLEAN S, NAIR M, et al. The US/UK world magnetic model for 2010-2015[R]. NOAA Technical Report NESDIS/NGDC, 2010.
- [9] 刘颖玮,胡长德,朱砂. 地磁仿真环境系统的构建[J]. 电子测量技术,2010,33(1):4-7. (LIU Y W, HU C D, ZHU S. Foundation of kind of magnetic environment simulation[J]. Electronic Measurement Technology, 2010, 33(1):4-7.)
- [10] 乔玉坤,王仕成,张琪. 地磁匹配特征量的选择[J]. 地震地磁观测与研究,2007,28(1):42-47. (QIAO Y K, WANG S C, ZHANG Q. Selection of the characteristic variable of geomagnetism for matching[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2007, 28(1):42-47.)
- [11] 李季,张琦,潘孟春,等. 载体干扰磁场补偿方法[J]. 国防科学技术大学学报,2013,35(3):7-11. (LI J, ZHANG Q, PAN M C, et al. The vehicle interferential magnetic field compensation method[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013,35(3):7-11.)
- [12] FINLAY C C, MAUS S, BEGGAN C D, et al. Internatio-

- nal geomagnetic reference field: The 11th generation [J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 183 (3): 1216-1230.
- [13] 刘元元,王仕成,张金生,等.最新国际地磁参考场模型 IGRF11 研究[J].*地震学报*,2013,35(1):125-134. (LIU Y Y, WANG S C, ZHANG J S, et al. Research on the eleventh generation IGRF [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2013, 35(1):125-134.)
- [14] 王哲,王仕成,张金生,等.一种地磁匹配制导基准图制备方法及其有效性评价[J].*系统工程与电子技术*,2008,30(11):2207-2211. (WANG Z, WANG S C, ZHANG J S, et al. Method for preparation of reference map in geomagnetism matching guidance and its validity evaluation [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(11):2207-2211.)
- [15] 韦春建,史振宇.德国海军消磁系统发展现状及应用[J].*船电技术*,2013,33(6):36-38. (WEI C J, SHI Z Y. Comments on the degaussing system development and application of Federal German Navy [J]. *Marine Electric & Electronic Engineering*, 2013, 33(6):36-38.)
- [16] GEBRE-EGZIABHER D, ELKAIM G H, POWELL J D, et al. Calibration of strapdown magnetometers in magnetic field domain [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2006, 19(2):87-102.
- [17] 张晓明,赵剡.基于椭圆约束的新型载体磁场标定及补偿技术[J].*仪器仪表学报*,2009,30(11):2438-2443. (ZHANG X M, ZHAO Y. New auto-calibration and compensation method for vehicle magnetic field based on ellipse restriction [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(11):2438-2443.)
- [18] LI J, PAN M C, LUO F L, et al. Vehicle magnetic field compensation method using UKF [C]//*Proceedings of the 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, 2011:25-28.
- [19] 王红强,金海强,杨涛.地磁场跟踪补偿与动态模拟实验研究[C]//中国地球物理学会第25届年会,合肥,2009:418. (WANG H Q, JIN H Q, YANG T. Experimental study of tracking compensation and dynamic simulation of geomagnetic field [C]//*The 25th Annual of the Chinese Geophysical Society*, Hefei, 2009:418.)
- [20] 姜硕,李慧,孙大成.一种程控标准电流源设计[J].*微处理器*,2013,34(3):16-17. (JIANG S, LI H, SUN D C. Design on programmable standard current source [J]. *Microprocessors*, 2013, 34(3):16-17.)
- [21] SUN Y, ZHANG J S, QIAO Y K, et al. Matching area intelligent selection method in geomagnetic navigation [C]//*IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, Xiamen, 2010:860-864.
- [22] 周贤高,李士心,杨建林,等.地磁匹配导航中的特征区域选取[J].*中国惯性技术学报*,2008,16(6):694-698. (ZHOU X G, LI S X, YANG J L, et al. Selective criteria of characteristic area on geomagnetic map [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2008, 16(6):694-698.)
- [23] 何兵,刘刚,闫建铮,等.基于Voronoi图和量子遗传算法的飞行器航迹规划方法[J].*电光与控制*,2013,20(1):5-8. (HE B, LIU G, YAN J Z, et al. A UAV route planning method based on Voronoi diagram and quantum genetic algorithm [J]. *Electronics Optics & Control*, 2013, 20(1):5-8.)
- [24] 焦巍,刘光斌,张金生,等.基于粒子群算法的地磁匹配航迹规划[J].*系统工程理论与实践*,2010,30(11):2106-2111. (JIAO W, LIU G B, ZHANG J S, et al. Geomagnetic matching path planning based on PSO algorithm [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2010, 30(11):2106-2111.)
- [25] LUO S T, WANG Y L, LIU Y, et al. Research on geomagnetic-matching technology based on improved ICP algorithm [C]//*IEEE International Conference on Information and Automation*, 2008:815-819.
- [26] 吴美平,刘颖,胡小平. ICP 算法在地磁辅助导航中的应用[J].*航天控制*,2007,25(6):17-21,26. (WU M P, LIU Y, HU X P. Application of ICP algorithm in geomagnetism aided navigation system [J]. *Aerospace Control*, 2007, 25(6):17-21,26.)
- [27] 刘飞,周贤高,杨晔,等.相关地磁匹配定位技术[J].*中国惯性技术学报*,2007,15(1):59-62. (LIU F, ZHOU X G, YANG Y, et al. Geomagnetic matching location using correlative method [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2007, 15(1):59-62.)
- [28] 陈励华,王仕成,孙渊,等.地磁缓变区域的多维特征量匹配方法[J].*中国惯性技术学报*,2011,19(6):720-724. (CHEN L H, WANG S C, SUN Y, et al. Matching of multi-dimensional feature elements in areas with smooth magnetic fields [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2011, 19(6):720-724.)
- [29] 王胜平,张红梅,赵建虎,等.利用TERCOM与ICCP进行联合地磁匹配导航[J].*武汉大学学报:信息科学版*,2011,36(10):1209-1212. (WANG S P, ZHANG H M, ZHAO J H, et al. Marine geomagnetic navigation technology based on integration of TERCOM and ICCP [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(10):1209-1212.)
- [30] 周莹莹,张延顺,郭雷.地磁/惯性组合导航系统半物理仿真研究[J].*控制工程*,2011,18(s1):15-17. (ZHOU Y Y, ZHANG Y S, GUO L. Hardware in-the-loop simulation of GNS/INS integrated navigation system [J]. *Control Engineering of China*, 2011, 18(s1):15-17.)