

不同传感器精度下的地磁轮廓匹配定位性能分析*

赵龙^{1)2)†} 颜廷君²⁾

1) (北京航空航天大学, 飞行器控制一体化技术重点实验室, 北京 100191)

2) (北京航空航天大学数字导航中心, 北京 100191)

(2012年8月25日收到; 2013年1月5日收到修改稿)

地磁基准图、地磁传感器和惯导系统的精度是影响地磁匹配系统可靠性的关键因素. 为提高地磁匹配系统的可靠性, 研究了传感器精度对地磁匹配成功率的影响; 针对不同地磁基准图, 分析了地磁传感器误差、速度误差和航向角误差对地磁匹配成功率影响的物理机理, 根据实际要求通过仿真确定了地磁匹配系统中各传感器的误差范围, 并进行了实验测试. 测试结果表明, 在地磁匹配成功率大于 90% 时, 速度误差 < 0.14 m/s, 航向角误差 $< 0.6^\circ$, 地磁传感器标准差 < 11 nT.

关键词: 地球物理场导航, 地磁场, 地磁轮廓匹配, 性能分析

PACS: 77.22.Ch, 84.40.Dc, 91.25.C

DOI: 10.7498/aps.62.067702

1 引言

在现代军民领域应用的无人飞行器(例如无人机和巡航导弹)对自主导航系统精度和可靠性要求越来越高, 要求实时、可靠地提供无人飞行器的位置、速度和姿态信息. 依靠单一的导航系统很难满足要求, 将惯性导航系统与卫星定位系统信息进行融合来提供载体的运动信息已被广泛应用在无人飞行器自主导航系统中^[1]. 然而由于卫星定位信号易受干扰或欺骗, 甚至信号转发源被摧毁, 不能够长期提供稳定可靠的定位信息, 在军民领域尚不能完全依赖卫星定位来辅助惯性导航实现飞行器的精确导航定位. 因此, 研究具有自主性强和定位精度高的其他辅助导航, 例如地形辅助导航、地磁匹配辅助导航和重力匹配辅助导航等, 已成为提高无人飞行器导航/制导精度以及系统可靠性的有效手段之一^[2,3].

经过近 60 年的发展, 地形辅助导航技术已被成功应用在无人飞行器上. 但由于在海洋、沙漠和平原等地形地物特征信息缺乏的区域, 地形辅助导

航技术受到限制, 甚至无法完成定位. 地磁场是地球的固有资源, 而且地磁导航具有无源、无辐射、全天时、全天候、全地域以及低能耗的优良特征, 已成为国际导航领域的研究热点^[3-5].

从 20 世纪 60 年代起, 美国 E-systems 公司研究了地磁场等值线匹配 (magnetic contour matching, MAGCOM) 系统, 并进行了离线实验^[6]. 20 世纪 80 年代, 瑞典 Lund 学院对船只地磁导航进行了实验验证, 并通过地磁匹配确定船只的位置和速度^[7]. 美国在导弹试验方面已开始应用地磁信息, 并利用 E22 飞机进行高空地磁数据测量. 目前, 美国已研发出地面和空中定位精度优于 30 m, 水下定位精度优于 500 m 的地磁导航系统^[8]. NASA Goddard 空间中心和有关大学对水下地磁导航进行了研究, 并进行了大量的地面试验^[9]. Goldenberg^[6] 针对飞机的地磁导航系统将测量的地磁异常场强度序列与事先存储的地磁异常图实时进行相关匹配, 确定飞机在地磁异常图上的经度和纬度. 国内对地磁导航研究还主要集中在仿真和预研阶段^[10,11]. 本文分析了各传感器误差对地磁匹配成功率影响的物理机理, 通过实验研究各传感器误差与地磁匹配成功

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 61039003)、国家自然科学基金 (批准号: 41274038)、中国航空基础科学基金 (批准号: 20100851018) 和中国航天创新基金 (批准号: CASC2011102).

† 通讯作者. E-mail: buaa_dnc@buaa.edu.cn

率间的关系, 并进行地磁匹配实验测试, 为传感器的选型以及系统可靠性研究提供参考依据.

2 地磁匹配导航原理及性能分析

2.1 地磁匹配导航原理

地磁匹配导航技术是利用地磁传感器和地磁基准图作为辅助手段来修正惯导系统误差的一项技术, 其原理是通过地磁传感器测得的实时地磁数据与存储在计算机中的地磁基准图数据进行分析计算, 实现载体导航定位. 地磁匹配导航系统的精度与地磁基准图和系统传感器的精度有关, 系统误差与系统参数间的关系如图 1 所示.

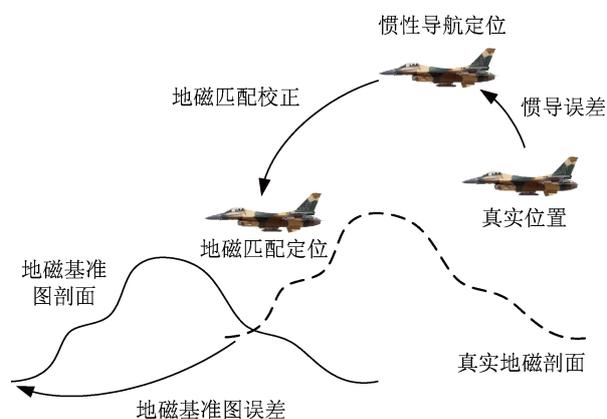


图 1 地磁匹配导航系统参数间的关系

地磁场等值线匹配算法的原理是当载体运动一段时间后即可测得真实航迹下一串地磁矢量序列, 通过对实测航迹下方的地磁序列与计算机中存储的地磁基准图数据进行分析来确定载体位置的估计值, 其典型算法有三种^[12]

交叉相关 (cross correlation, COR) 算法

$$J_{COR} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L T_A(i) \cdot T_S(x + i\tau_x, y + i\tau_y); \quad (1)$$

平均绝对差 (mean absolute difference, MAD) 算法

$$J_{MAD} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L |T_A(i) - T_S(x + i\tau_x, y + i\tau_y)|; \quad (2)$$

均方差 (mean square difference, MSD) 算法

$$J_{MSD} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L [T_A(i) - T_S(x + i\tau_x, y + i\tau_y)]^2; \quad (3)$$

式中, L 为采样地磁序列长度, $T_A(i)$ 为计算获得的第 i 个地磁强度值 ($i = 1, 2, \dots, L$), $T_S(x + i\tau_x, y + i\tau_y)$

为对应的第 i 个地磁强度值, $D(T_A)$ 为地磁强度序列 $T_A(i)$ 的方差, x, y 为所选进行匹配的网格中心坐标, τ_x, τ_y 为飞行器在相邻两次采样之间飞行器在两坐标轴上飞行经过的距离, 若飞行器匀速飞行, 则两者为常值. 最佳定位位置使 J_{COR} 最大, J_{MAD} 和 J_{MSD} 最小.

2.2 匹配成功率

在地磁匹配过程中, 地磁匹配位置与真实轨迹位置之差小于一个网格时, 则认为地磁匹配结果是有效的. 在一条航线上正确匹配次数 Num_{match} 与总共匹配次数 Num_{total} 之比称为匹配成功率. 在匹配结果统计仿真中, 在某块地磁图上的一定误差条件下取 N 条航线做匹配仿真验证, N 条航线匹配成功率的平均值作为一次统计仿真的匹配成功率, 即

$$P = \frac{1}{N} \left[\frac{Num_{match}^1}{Num_{total}^1} + \dots + \frac{Num_{match}^N}{Num_{total}^N} \right]. \quad (4)$$

2.3 影响地磁匹配性能的因素及其物理机理

地磁匹配导航系统的定位精度和可靠性取决于地磁基准图、地磁传感器测量精度以及惯导系统的精度. 当地磁基准图的精度和分辨率已知时, 地磁传感器测量误差、惯导系统的速度误差和航向角误差成为影响地磁匹配系统匹配成功率的主要因素. 在同一块地磁图上, 地磁传感器的噪声增大, 地磁轮廓测量值与地磁轮廓真实值差别增大, 与预先存储的地磁基准图进行相关分析的匹配结果可信度降低, 直接导致匹配成功率下降. 当地磁传感器的测量噪声过大 (磁传感器易受外界磁干扰的影响), 特别是噪声淹没有用信息的时候, 地磁匹配系统将无法工作, 因此地磁传感器的测量精度在该系统中是主要因素.

在同等测量误差的前提下, 惯导系统速度误差使得真实轨迹中地磁强度的采样间隔与在数字地图上的采样间隔产生偏差, 采样间隔偏差的积累, 会导致测得真实航迹下方的地磁矢量序列 F_c 与根据惯导指示位置从数字地图中获得的地磁强度序列 F_m 产生偏差, 如图 2 所示. 若以当前时刻 k 为基准 (假设 k 时刻在地图上找出平行于导航系统指示路径的位置与 k 时刻的真实地理位置重合), 离 k 时刻越远, 两个地磁矢量序列对应点的偏差越大, 若

有多半的基准图地磁采样点的位置与实际采样点的位置相差一个网格以上, 利用相关分析算法获得的地磁匹配结果是不可靠的. 随着速度误差增大, 由采样间隔偏差积累的网格误差越大, 导致其匹配成功率下降越快. 而在相同速度误差下, 相对较大的地图采样间隔其误差积累的网格偏差较小, 因此较大网格的地图受速度误差影响较小. 但是, 随着网格的增大, 地磁匹配存在的半个网格的量化误差也会导致匹配位置误差的增大.

同理, 航向角误差的存在, 导致真实航迹与惯导指示航迹间存在夹角, 使得由磁罗盘采集的地磁矢量序列与根据惯导指示位置从地磁基准图中获得的地磁矢量序列产生偏差, 如图 3 所示. 随着航向角误差的增大, 真实航迹与惯导指示航迹间存在的夹角越大, 其匹配成功率下降越快. 而在相同的航向角误差下, 相对较大的地磁图网格, 采样间隔误差积累的网格偏差较小, 所以较大网格的地磁图受航向角误差影响较小.

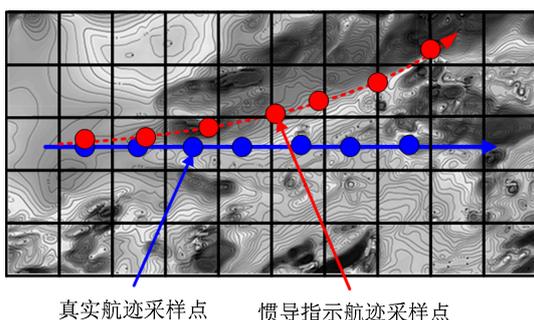


图 2 速度误差对匹配成功率影响的原理

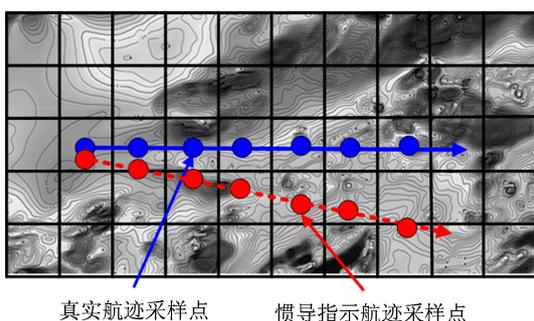


图 3 航向角误差对匹配成功率影响的原理

3 数值计算和实验测试

3.1 地磁匹配系统性能分析测试

在仿真测试时, 载体真实速度 $v = 20 \text{ m/s}$, 取某

地区地磁基准图数据 2 块, 其分辨率分别为 50 m 和 100 m, 每块地磁图设航线 20 条.

3.1.1 地磁传感器误差对匹配性能的影响

根据上述仿真条件, 在每条航线上, 地磁传感器的误差取 1, 2, 3, ..., 16 nT, 即每条航线做 16 次仿真, 不考虑惯导速度误差和航向角误差对匹配成功率的影响. 在分辨率为 50 m 和 100 m 的地图上进行地磁匹配仿真计算的结果如图 4 所示, 其中在分辨率为 50 m 的地图上进行仿真计算的统计结果如图 4(a) 所示, 在分辨率为 100 m 的地图上进行仿真计算的统计结果如图 4(b) 所示.

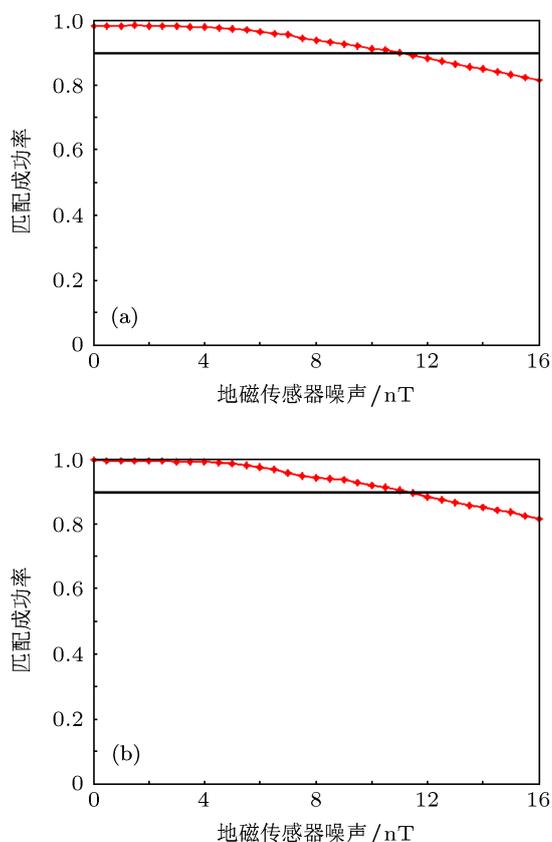


图 4 地磁传感器精度对地磁匹配成功率的影响 (a) 50 m 网格; (b) 100 m 网格

从图 4(a) 和图 4(b) 中可以看出, 当地磁总强度 F_{nt} 噪声标准差 $< 11 \text{ nT}$ 时, 系统匹配成功率 $> 90\%$. 由于地磁场变化比较缓慢, 地磁传感器精度对于地磁匹配系统的影响很大, 当地磁传感器测量精度较差, 匹配成功率将会大幅下降. 此外, 在分辨率为 50 m 和 100 m 网格的地磁基准图上进行仿真计算的统计结果基本相同, 地磁基准图分辨率对匹配成功率的影响很小, 这是因为同一块地磁图, 分辨率不同只是网格间距的大小不同, 且地磁传感器的噪声变化未引起采样间隔的变化, 仅仅是地磁剖面的

轮廓发生改变,当地磁传感器误差超过一定数值时,地磁传感器采集的地磁剖面与真实的剖面不相关了,匹配成功率开始下降.

3.1.2 速度误差对匹配成功率的影响

不考虑航向角误差,地磁传感器总强度 F_{nt} 噪声标准差为 10 nT,惯导速度误差取 $\Delta v = -2.0, -1.9, \dots, 0, \dots, 1.9, 2.0$ m/s,即每条航线仿真计算 20 次.在分辨率为 50 m 和 100 m 的地图上进行地磁匹配仿真计算的结果如图 5 所示,其中在分辨率为 50 m 的地磁图上进行仿真计算的统计结果如图 5(a) 所示,在分辨率为 100 m 的地磁图上进行仿真计算的统计结果如图 5(b) 所示.

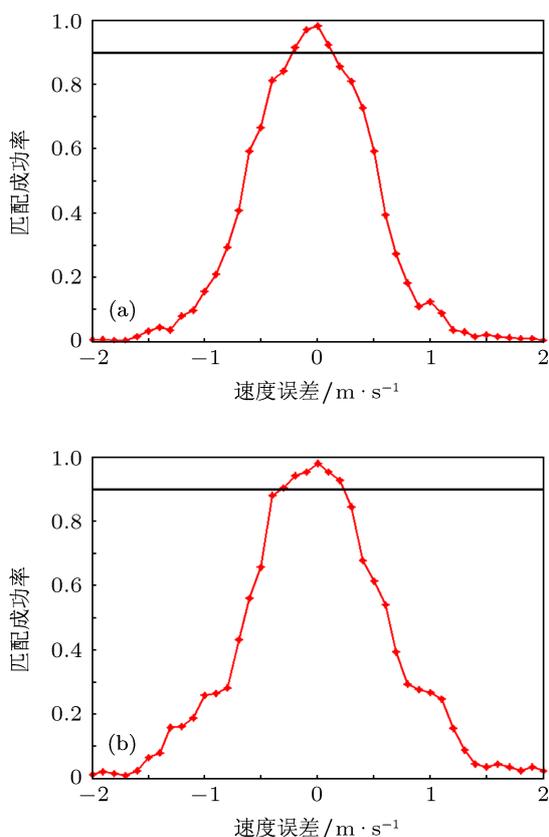


图 5 速度误差对地磁匹配成功率的影响 (a) 50 m 网格; (b) 100 m 网格

从图 5 中可以看出,在分辨率为 50 m 和 100 m 的地图上要求匹配成功率 > 90% 时,惯导系统速度误差范围分别在 $-0.2 \text{ m/s} < \Delta v < 0.14 \text{ m/s}$ 和 $-0.3 \text{ m/s} < \Delta v < 0.24 \text{ m/s}$,而且在惯导系统速度误差相同的情况下,不同地磁基准图对匹配成功率的影响很小,而不同分辨率的地磁图对匹配成功率的影响很大;随着速度误差的增大,分辨率越高的地磁图的匹配成功率下降得越快.这是因为在相同的速度误差条件下,较低分辨率的地图的网格间距

较大,使得采样间隔误差积累的网格偏差相对较小,导致较低分辨率地图的匹配成功率受速度误差影响较小.

3.1.3 航向角误差对地磁匹配成功率的影响

不考虑速度误差,地磁传感器总强度 F_{nt} 噪声标准差为 10 nT,航向角误差取 $\delta\phi_z = 0^\circ, 0.1^\circ, 0.2^\circ, \dots, 4^\circ$,即每条航线仿真计算 40 次.在分辨率为 50 m 和 100 m 的地图上进行地磁匹配仿真计算的结果如图 6 所示,其中在分辨率为 50 m 的地磁图上进行仿真计算的统计结果如图 6(a) 所示,在分辨率为 100 m 的地磁图上进行仿真计算的统计结果如图 6(b) 所示.

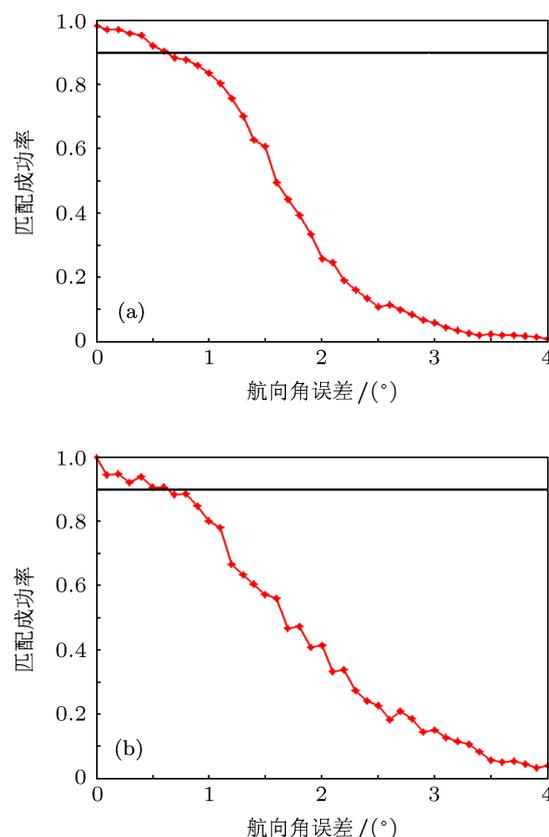


图 6 航向角误差对地磁匹配成功率的影响 (a) 50 m 网格; (b) 100 m 网格

从图 6 中可以看出,在分辨率为 50 m 和 100 m 的地磁图上要求匹配成功率 > 90%,惯导系统航向角误差 < 0.6°,而且在相同航向角误差条件下,不同地磁图对匹配成功率的影响很小,而不同分辨率的地磁图对匹配成功率的影响很大,随着航向角误差的增大,分辨率越高的地磁基准图其匹配成功率下降越快.而在相同航向角误差条件下,由于较低分辨率的地磁图采样间隔导致误差积累的网格偏差相对较小,因此低分辨率地磁图的匹配成功率受

航向角误差影响较小.

3.2 地磁匹配系统实验测试

实验测试时选用某区域的地磁图, 其大小为 512 行 × 1294 列的地磁矢量场, 分辨率为 50 m × 50 m, 仿真过程中, 速度为 20 m/s, 仿真时间为 94.6 s, 初始位置误差 $\Delta x = 200$ m, $\Delta y = 200$ m, 速度误差 0.02 m/s, 航向角误差 0.4°, 根据霍尼韦尔 HMR2300 三轴地磁传感器的测量精度对 X, Y 和 Z 轴设置的测量噪声分别为 8.5, 6 和 10 nT.

根据上述仿真条件, 采用 MAGCOM 算法进行仿真时的定位误差如图 7 所示.

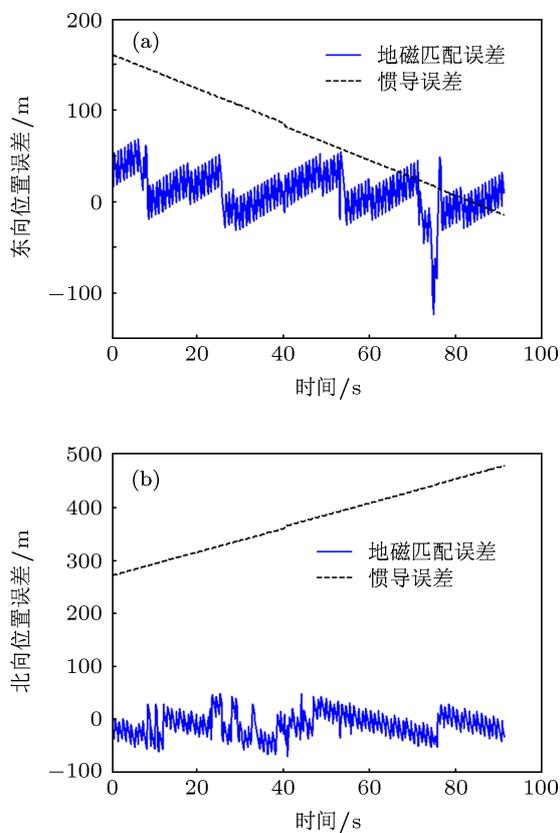


图 7 MAGCOM 算法计算机仿真结果 (a) 东向位置误差; (b) 北向位置误差

从图 7 中可以看出, 在系统传感器误差的允许范围内, 采用 MAGCOM 算法的定位误差在 50—100 m 间, 部分匹配点误差超过 100 m 可以通过误

匹配检测算法将该匹配点剔除掉, 从而保证地磁匹配的可靠性.

根据上述理论分析和实验结果, 利用霍尼韦尔公司生产的地磁传感器 HMR2300 以及惯导系统和全球卫星定位系统 (global positioning system, GPS) 进行跑车采集实测数据. 利用实测数据进行离线仿真验证并以 GPS 定位结果为基准, 仿真结果及其统计分析结果分别如图 8 和表 1 所示, 其中地磁匹配误差分别为 GPS 的东北向位置与地磁匹配东北向位置之间的差值.

从图 8 和表 1 中可以看出, 利用跑车实测数据进行 MAGCOM 算法的定位误差在 30 m 以内, 其定位精度 ≤ 16 m, 而且匹配成功率达到了 100%, 进一步验证了本文对影响地磁匹配系统可靠性关键因素及其物理机理分析的正确性, 也验证了 MAGCOM 算法的有效性.

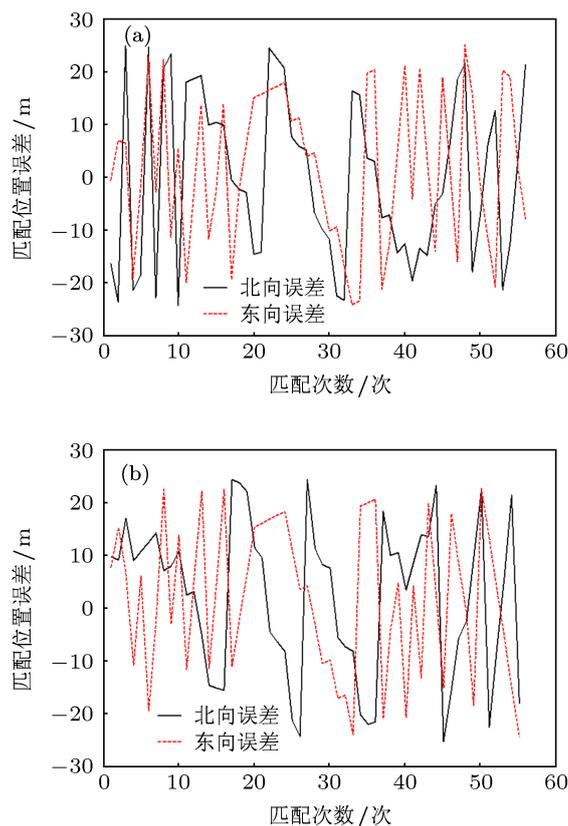


图 8 地磁匹配跑车实验数据测试结果 (a) 路线 1 匹配误差; (b) 路线 2 匹配误差

表 1 实际跑车实验数据统计结果

	总匹配点数	匹配结果 (≤ 1 网格)		东向位置误差 /m		北向位置误差 /m	
		点数	匹配成功率	均值	标准差	均值	标准差
路线 1	56	56	100%	1.95	14.42	0.04	15.95
路线 2	55	55	100%	1.89	14.25	2.19	14.60

4 结论

本文针对地磁匹配导航系统的传感器选型和地磁匹配系统可靠性问题,开展了传感器精度对地磁匹配成功率的影响研究.首先从理论上分析了影

响地磁匹配成功率的因素,然后利用不同分辨率的地磁基准图进行大量的统计仿真实验,通过仿真验证获得了系统传感器精度与系统可靠性间的约束关系,为实际地磁匹配系统传感器选型以及进一步实验测试提供理论参考.

- [1] Abdelkrim N, Aouf N 2010 *IEEE Sens. J.* **10** 789
- [2] Vadlamani A K 2007 *Ph. D. Dissertation* (USA: Ohio University)
- [3] Wang X L, Tian Y F 2010 *Chin. J. Geophys.* **53** 2724 (in Chinese) [王向磊, 田颜锋 2010 地球物理学报 **53** 2724]
- [4] Guo C F, Hu Z D, Zhang S F, Cai H 2009 *J. Astron.* **30** 1314 (in Chinese) [郭才发, 胡正东, 张士峰, 蔡洪 2009 宇航学报 **30** 1314]
- [5] Sun H, Feng Y, An Z C, Mao F 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8941 (in Chinese) [孙涵, 冯彦, 安振昌, 毛飞 2010 物理学报 **59** 8941]
- [6] Goldenberg F 2006 *IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium* San Diego, USA, April 25–27, 2006 p684
- [7] Tyrén C 1982 *J. Navigat.* **35** 242
- [8] Peng F Q 2006 *Hydrographic Surveying and Charting* **26** 73 (in Chinese) [彭富清 2006 海洋测绘 **26** 73]
- [9] Mu H, Ren Z X, Hu X P 2007 *J. Chin. Inertial Technol.* **15** 322 (in Chinese) [穆华, 任治新, 胡小平 2007 中国惯性技术学报 **15** 322]
- [10] Li S M, Zhang W Q 2004 *Guidance & Fuz* **25** 19 (in Chinese) [李素敏, 张万清 2004 制导与引信 **25** 19]
- [11] Yan D Y, Ren J X, Song Y J 2007 *Mach. Electron.* **25** 19 (in Chinese) [晏登洋, 任建新, 宋永军 2007 机械与电子 **25** 19]
- [12] Zhao L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 104301 (in Chinese) [赵龙 2012 物理学报 **61** 104301]

Positioning performance evaluation of magnetic contour matching under different accuracy of sensor*

Zhao Long^{1)2)†} Yan Ting-Jun²⁾

1) (Science and Technology on Aircraft Control Laboratory, Beihang University, Beijing 100191, China)

2) (Digital Navigation Center, Beihang University, Beijing 100191, China)

(Received 25 August 2012; revised manuscript received 5 January 2013)

Abstract

The accuracy of geomagnetic reference map, geomagnetic sensor, and inertial navigation system is the key factor which affects the reliability of magnetic contour matching (MAGCOM) system. In order to improve the reliability of MAGCOM, the influence of the sensor's accuracy on the matching success rate has been studied. For different geomagnetic reference maps, the factors and their physical mechanism affecting matching success rate have been analyzed, the factors are geomagnetic sensor error, velocity error, and heading angle error. The error range of sensors was determined by the simulation computing which was based on a practical system and a simulation experimentation was implemented by using the geomagnetic reference map. The simulation results show that MAGCOM can allow the velocity error < 0.14 m/s, the heading angle error $< 0.6^\circ$ and the standard deviation of geomagnetic sensor noise < 11 nT, when the matching success rate is $> 90\%$.

Keywords: geophysical field navigation, geomagnetic field, magnetic contour matching, performance evaluation

PACS: 77.22.Ch, 84.40.Dc, 91.25.C

DOI: 10.7498/aps.62.067702

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61039003), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41274038), the Aeronautical Science Foundation of China (Grant No. 20100851018) and the Aerospace Innovation Foundation of China (Grant No. CASC201102).

† Corresponding author. E-mail: buaa.dnc@buaa.edu.cn