

地磁导航中载体涡流干扰场特性的仿真分析

李 驰¹, 杨宾峰¹, 樊博宇², 胥俊敏¹, 孙 欢¹

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077; 2. 电子信息控制重点实验室, 成都, 610036)

摘要 地磁导航中的测量误差是影响地磁导航精度的关键因素,而包括涡流磁场在内的载体干扰磁场是产生误差的主要因素。目前各种运载体大量使用铁磁性材料,这样不可避免地会引起涡流磁场等干扰磁场。因此文中采用 COMSOL Multiphysics 仿真软件,建立了高速运动载体的涡流干扰场仿真模型。首先研究了永磁体与匀强磁场之间的关系,发现永磁体的剩磁越强,匀强场也越强,为模拟地磁场提供了理论依据。其次分析了载体在匀速转动时涡流磁场对地磁测量的影响,最后研究了载体摆动时的涡流场的分布。结果表明涡流磁场随着速度的增大而增强,且涡流磁场主要分布于载体中间位置。仿真结果为下一步地磁导航中的误差建模以及磁场校正技术的研究提供了理论依据。

关键词 地磁导航;运载体;高速运动;涡流磁场

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.04.013

中图分类号 V249.32 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)04-0072-07

An Analysis of Eddy Current Interference Field Characteristics of Carrier in Geomagnetic Navigation

LI Chi¹, YANG Bin Feng¹, FAN Boyu², XU Junmin¹, SUN Huan¹

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Science and technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu 610036, China)

Abstract: The measurement error in geomagnetic navigation is a key factor of affecting the accuracy of geomagnetic navigation, and the carrier interferential magnetic field, including eddy current magnetic field, is the main factor of error. At present, a large number of carriers made of ferromagnetic materials inevitably cause eddy magnetic fields and other interferential magnetic fields. Therefore, this paper establishes a simulation model of eddy interferential magnetic field of high-speed moving carrier by adopting COMSOL Multiphysics simulation software. First, the relationship between permanent magnet and uniform magnetic field is studied. It turned out to be that the stronger the remains of permanent magnet, the stronger the uniform magnetic field, which provides a theoretical basis for simulating the geomagnetic field. Secondly, the influence of eddy current magnetic field on geomagnetic measurement is analyzed when the carrier rotates at constant speed. Finally, the distribution of eddy current field is studied when the carrier swings. The results show that the eddy current magnetic field increases with the increase of velocity, and the eddy current magnetic field is mainly located in the middle of the carrier. The simulation results provide a theo-

收稿日期: 2017-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(51577191);电子信息控制重点实验室基金

作者简介: 李 驰(1994—),男,陕西咸阳人,硕士生,主要从事地磁导航技术研究。E-mail: Nac1_1208@163.com

引用格式: 李驰, 杨宾峰, 樊博宇. 地磁导航中载体涡流干扰场特性的仿真分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(4): 72-78.
LI Chi, YANG Bin Feng, FAN Boyu, et al. An Analysis of Eddy Current Interference Field Characteristics of Carrier in Geomagnetic Navigation [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(4): 72-78.

retical basis for the error modeling and the magnetic field correction technology in the future geomagnetic navigation.

Key words: geomagnetic navigation; carriers; high speed motion; eddy magnetic field

地磁导航的概念在 20 世纪 60 年代被提出,20 世纪 80 年代末美国康奈尔大学的 Psiaki 等人率先提出利用地磁场确定卫星轨道的概念后,地磁导航才成为导航领域的研究热点^[1]。

地球磁场非常稳定而且包含丰富的地磁场特征量^[1],如磁场总强度、强度梯度、磁倾角和磁偏角等,这些特征量与地理位置具有一一对应关系,因此地磁导航作为一种无源、无辐射、抗干扰、全天候的自主导航方式,在导航领域具有广泛的应用前景^[2-4]。

地磁导航通过把磁力仪测得的实时地磁数据与事先制备的地磁图进行匹配来提供导航服务^[5-7]。实现地磁导航的关键技术之一就是准确地测量地磁场数据^[8-10]。由于地磁导航主要应用于水下无人潜航器,无人飞行器等和军事领域密切相关的载体,而在这些载体上大量使用铁磁性材料,导致在测量过程中不可避免地产生载体干扰磁场^[11]。干扰磁场对地磁测量数据影响较大,如果不对干扰场加以研究并进行误差补偿的话,就无法获得准确的地磁数据进行匹配^[12-13]。因此,研究载体的干扰磁场对地磁测量的影响具有十分重要的意义。

在地磁测量中,影响测量的干扰主要包括磁力仪的仪表误差、硬磁干扰、软磁干扰和涡流磁场干扰等。仪表误差可以通过对磁力仪提前标定来消除,与载体和地磁场没有关系。而硬磁干扰、软磁干扰、涡流磁场都是与载体有关的干扰磁场,是地磁测量中所特有的误差^[14]。在载体干扰磁场的研究中,国内外学者研究的载体多为陆用车辆和水下航行器,而且集中于研究硬磁干扰和软磁干扰。比如国外的 D. Gebre 首次提出无需初始估值的 Two-Step 法对地磁测量误差进行补偿,解决了对初值依赖性强的问题,但模型中只考虑了仪表误差和硬磁干扰;国防科大在国内地磁导航领域处于领先,其中胡小平团队在研究水下无人潜航器的地磁测量误差补偿时,对仪表误差、硬磁干扰、软磁干扰和随机磁场误差进行了一体化建模,也没有考虑到涡流磁场干扰^[15-17]。后来李季对某水下低速载体的涡流磁场进行了研究,弥补了国内对涡流磁场研究的空白,但未明确涡流磁场在干扰磁场中所占的比重^[18]。而在飞机等高速运载体上涡流磁场的影响尚不清楚,如果能将涡流磁场对地磁测量的影响研究清楚,将为测量误差的一体化建模提供理论基础^[8]。

因此,本文主要研究高速运动载体的涡流干扰

磁场特性。采用 COMSOL Multiphysics 软件建立载体涡流干扰场的仿真模型,对匀速转动下涡流磁场与速度、载体位置、地磁场的关系以及摆动下涡流磁场与运动速度及方向的关系进行仿真分析,以指导磁力仪的安装和载体干扰场的补偿。

1 载体干扰磁场的产生机理

载体干扰磁场主要包括硬磁干扰,软磁干扰和涡流干扰磁场。硬磁干扰是由载体上铁磁性材料的剩磁引起的,由于硬磁材料具有高矫顽力,经磁化后保留时间较长,可认为是恒定值,所以硬磁干扰与载体的运动状态没有关系。软磁干扰是载体的软磁材料被地磁场磁化产生的,由于软磁材料具有较低的矫顽力,当地磁场改变时,软磁干扰也随之改变,因此软磁干扰与载体的运动姿态及地磁场密切相关^[19]。硬磁和软磁干扰对地磁测量的影响见图 1。

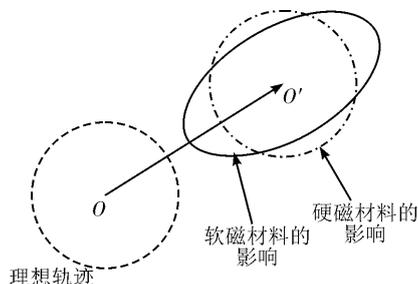


图 1 硬磁和软磁干扰影响下的地磁场测量轨迹

Fig. 1 Geomagnetic field measurement locus with hard and soft iron errors

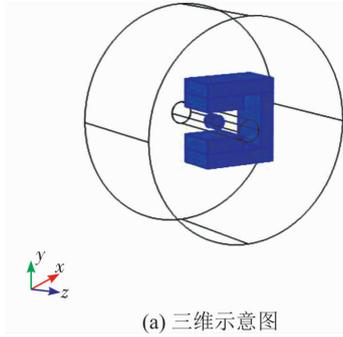
涡流干扰磁场是运载体在地磁场中运动时,载体上的金属导体切割磁力线产生的涡流磁场,当载体运动姿态发生改变时,产生的涡流会变化,涡流磁场也随之改变。飞机等载体在地磁场中高速运动时,产生的涡流磁场时刻在变化,如果不对涡流磁场的影响加以研究并进行补偿,将严重影响磁力仪的实时输出数据,导致导航误差越来越大甚至无法为飞机提供准确的导航定位。因此,研究高速运动载体的涡流磁场干扰具有重要的现实意义。

2 仿真模型的建立及匀强磁场特性分析

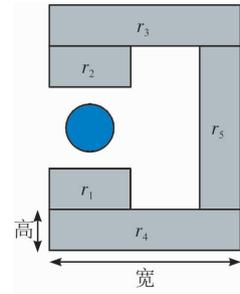
地球磁场全球分布且稳定,其强度随时间变化

极其缓慢,因此可将地磁矢量看成是随位置变化的函数。仿真模型中定性研究载体的运动状态对地磁场测量的影响,此时可认为地磁场是一个局部的匀强磁场^[20]。

采用 COMSOL Multiphysics 仿真软件,建立了一个圆柱形载体在匀强磁场中运动的三维仿真模型,见图 2。在模型中,用永磁体产生的匀强磁场来模拟地磁场^[21]。



(a) 三维示意图



(b) 二维示意图

图 2 模型示意图

Fig. 2 Diagram of the model

模型最外层为圆柱形的空气域,将模型限定在此空气域内,这是做有限元分析的条件。中间的 U 型结构为产生匀强磁场的装置,U 型结构中间有 2 个圆柱体,外层圆柱是建立的转动域,将整个仿真模型分为两部分,圆柱外侧为静止域,内侧为转动域,内层圆柱为实心铜载体,在转动域内做运动。模型的初始尺寸见表 1。

表 1 模型尺寸

Tab. 1 Model size

	空气域	转动域	载体	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5
半径/m	0.08	0.008	0.005					
高度/m	0.09	0.090	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.040
宽度/m				0.030	0.030	0.055	0.055	0.010
长度/m				0.030	0.030	0.030	0.030	0.030

产生匀强场的是一个 U 型结构,其中 r_5 是永磁体,初设的剩磁为 50 000 nT, r_1, r_2, r_3, r_4 都是磁轭,其在磁路中的作用主要是引导磁场的传播。

为了验证永磁体中心处是否产生了匀强磁场,在载体静止状态下对磁轭之间的磁场分布情况进行了稳态分析,结果见图 3,从图中可以看出,磁轭之间的磁力线分布均匀,且强于周围磁场,说明永磁体已经产生了匀强磁场。

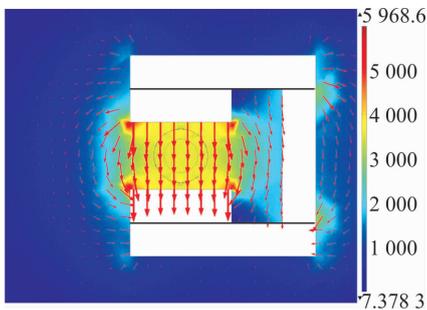


图 3 匀强场仿真

Fig. 3 Simulation on uniform field

为进一步验证永磁体剩磁的大小与其产生的匀强场强弱之间的定量关系,仿真得到了不同外加磁场下磁轭内部与载体轴心平行的路径上磁场的分布

曲线,结果见图 4。从图中可以明显看出,沿磁轭长度方向,磁场在中间位置呈匀强分布,在两端逐步减小。当改变永磁体的剩磁分别为 40 000 nT、50 000 nT 以及 60 000 nT 时,路径上的磁感应强度分别变为 2 858 nT、3 572 nT 和 4 287 nT,匀强场的磁感应强度之比近似于永磁体上剩磁的 4 : 5 : 6。因此得出结论,在材质和结构都不变的情况下,匀强场和永磁体的剩磁是成比例的,通过改变永磁体的剩磁大小,就可以产生不同强度的匀强磁场。

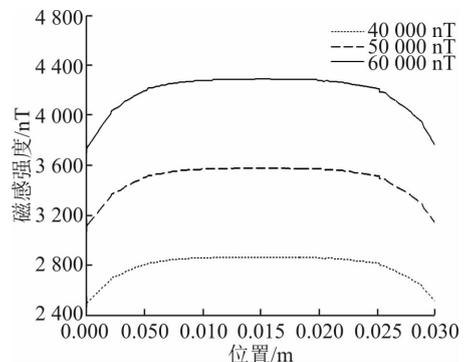


图 4 不同强度的永磁体产生的匀强场

Fig. 4 Uniform field produced by permanent magnets of different strength

3 载体运动对涡流磁场的影响

当模型可以产生匀强磁场后,将载体放入匀强磁场中进行运动特性研究。载体的运动主要包括转动和摆动 2 种方式,分别对载体在这 2 种运动方式下的涡流干扰磁场进行仿真。

3.1 载体匀速转动时

外加的匀强磁场沿 $-Y$ 轴方向,载体绕 Z 轴做匀速转动,见图 5。

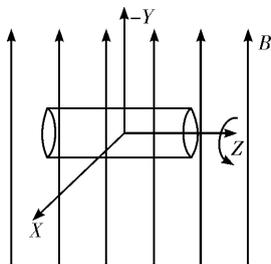


图 5 载体匀速转动

Fig. 5 Uniform rotation of carriers

匀速转动时,速度的大小在一个周期内保持恒定。当转速为 2 Hz 时,观察载体上的表面电流分布,从图 6 中可以看出,载体表面确实存在涡流。在一个周期内,涡流沿着顺时针方向在与 YOZ 平行的平面内流动,方向保持不变。

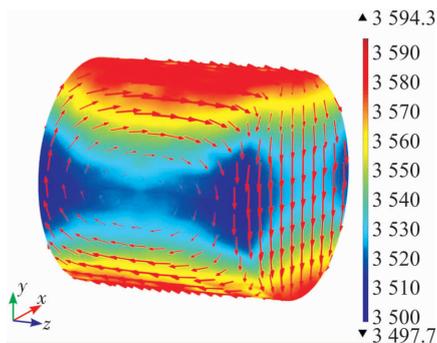


图 6 载体表面涡流分布

Fig. 6 Eddy current distribution on the surface of carriers

为了定性分析载体转速与涡流强度之间的关系,仿真中分别设置转速为 2 Hz 和 40 Hz,对模型进行瞬态分析,得到了不同转速下涡流强度在不同时刻的分布,结果见图 7。从图中可以看出,涡流强度在不同时刻基本保持不变,但在同一时刻,涡流在载体中间位置较大,两边较小,而且转速从 2 Hz 增加到 40 Hz 时,涡流有明显增强。这是由于当载体的转速增大时,其切割磁力线的速度也将加快,根据法拉第电磁感应定律,其感应的电动势将会增大,最

终导致载体中感应的涡流增强。

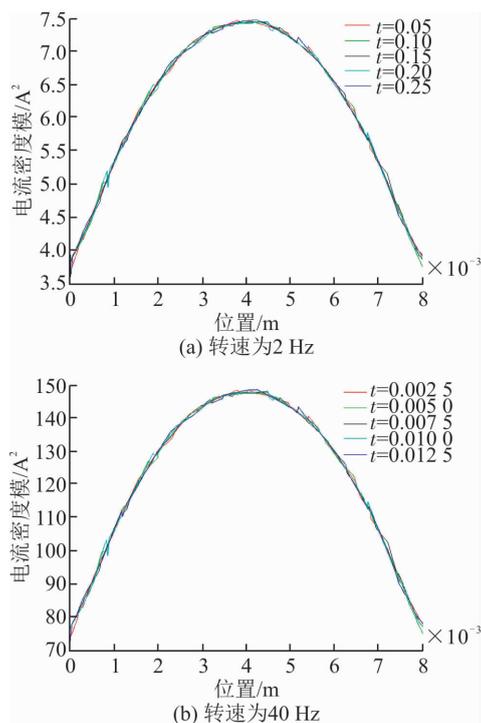


图 7 不同时刻的涡流强度

Fig. 7 Eddy current strength at different time
在分析了载体涡流与转速关系的基础上,需进一步明确涡流磁场强弱与载体转速的关系。仿真发现,当载体转速较小时,其感应的涡流很弱,因此涡流磁场强度也比较小,这样直接研究涡流磁场与转速的关系就不够直观。理论分析表明,载体周围的总磁场是外加磁场与涡流磁场之和,外加的匀强场强度在仿真中保持不变,因此可通过研究载体周围总磁场的变化情况来分析转速对涡流磁场的影响。仿真中设置的 5 组转动频率分别为 2 Hz、10 Hz、20 Hz、30 Hz、40 Hz,仿真得到的载体内部轴向路径上的总磁场强度曲线见图 8。

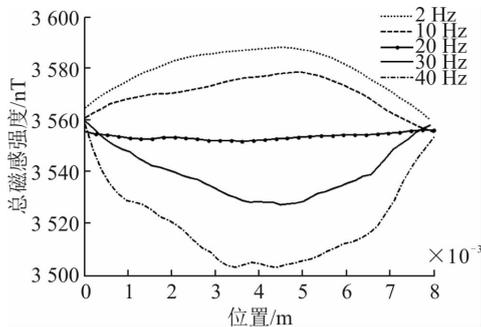


图 8 不同转速下的总磁感强度

Fig. 8 Total magnetic induction intensity at different speeds

从图 8 中可以看出,随着转速的增加,载体内部的总磁场强度明显减小。由楞次定律可知,感应电流产生的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变

化。也就是说,涡流磁场要阻碍磁通量的变化。当转速较小时,涡流磁场较弱,阻碍作用不明显;当速度逐渐增大,涡流磁场越来越强,阻碍作用也越来越强,从而导致载体的总磁感强度逐渐减小。

为了研究外加磁场对涡流场的影响,仿真中设置载体的转速为 100 Hz,永磁体的剩磁分别为 40 000 nT、50 000 nT 和 60 000 nT,得到了载体沿轴向的涡流磁场变化曲线,见图 9。从图中可以看出,涡流磁场的强度分别为 156 nT、195 nT、234 nT,三者之比近似等于 4 : 5 : 6,与永磁体的剩磁之比相同,上面的仿真分析已经表明,匀强磁场与永磁体的剩磁强度成正比关系,从而说明了涡流磁场与外加匀强磁场的强度也成线性关系。

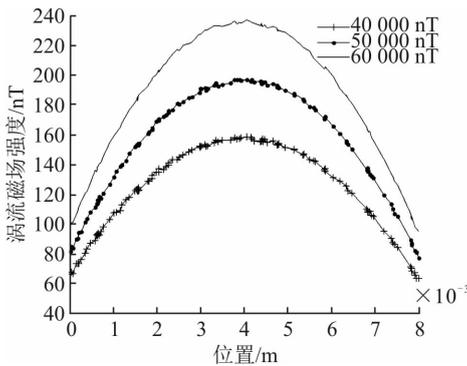


图 9 不同强度的永磁体感应的涡流强度

Fig. 9 Eddy current intensity induced by permanent magnets of different strength

3.2 载体摆动时

载体在摆动状态下,其在一个周期内运动速度和方向时刻发生着变化。仿真中摆动的曲线设定为正弦函数,载体从平衡位置开始运动,绕 Z 轴摆动,见图 10,摆动角频率为 628 rad/s,周期为 0.01 s,摆动幅度为 $\pi^2/30$,初始相位为 0° 。外加匀强磁场的方向沿 -Y 轴。

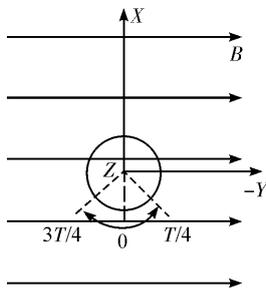


图 10 载体摆动

Fig. 10 Carrier swings

根据右手定则,当载体沿 Y 轴正向摆动时,涡流始终分布在与 YOZ 平行的平面上,其感应的涡流沿载体表面顺时针方向流动,沿 Y 轴负向摆动时,

其沿载体表面逆时针方向流动。为了验证载体摆动模型的正确性,对模型进行瞬态分析,观察载体在 $t=0.002$ s 和 $t=0.005$ s 时的涡流分布,结果见图 11,图中涡流的箭头大小表明了涡流的强弱,从图中可以得到 2 个方面的结论,首先,感应涡流的流向与载体的摆动方向密切相关,由于 $t=0.002$ s 时,载体沿 Y 轴正向摆动, $t=0.005$ s 时,载体沿 Y 轴负向摆动,因此其感应的涡流流向正好反向,这与理论的分析是一致的,也验证了仿真模型的正确性。其次,感应涡流的大小与载体速度密切相关,当 $t=0.002$ s 时,载体即将摆动到最大振幅处,因此其速度明显小于 $t=0.005$ s 时载体的速度,因为此刻载体刚好摆动到平衡位置,速度为最大值,从图中可以看出,在平衡位置的感应涡流明显强于其它位置,这与载体转动时的结论是一致的。

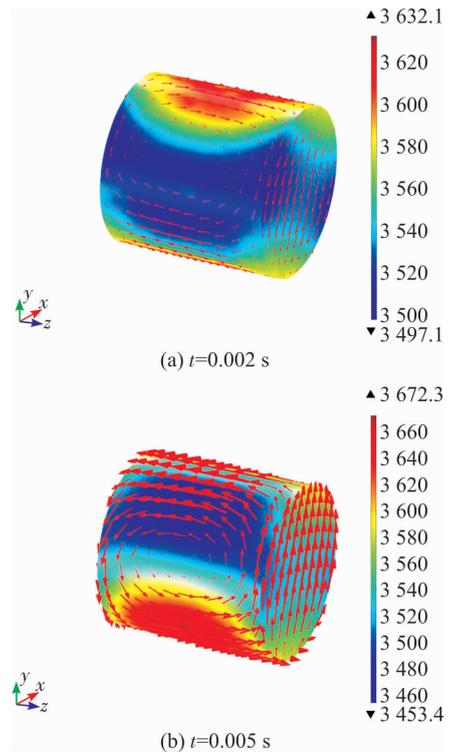


图 11 载体表面涡流分布

Fig. 11 Eddy current distribution on the surface of carriers

下面对一个周期内的涡流强度进行定性分析。仿真得到一个周期内不同时刻的涡流强度的分布曲线,见图 12。从图中可以看出,涡流的最大值出现在 $t=0.005$ s 和 $t=0.01$ s 时刻,此时载体摆动刚好经过平衡位置,其运动速度最大,因此感应涡流也最强;在其他位置处,随着载体摆动速度的减小,其感应的涡流也逐渐减小。

为了进一步验证摆动时涡流磁场与载体运动速度的关系,分别仿真得到了载体摆动 1/4 周期内 3 个不同时刻的总磁场强度曲线,见图 13。从图中可

以看出,当载体从 $t=0.003\text{ s}$ 的时刻摆动到 $t=0.005\text{ s}$ 时,其摆动位置从接近最大摆幅处一直运动到平衡位置差,因此其摆动的速度也将逐步增大,其感应磁场随着载体运动速度的增大将逐渐增大,导致总磁场强度逐渐减小。这与之前转动情况下得出的结论也是一致的。

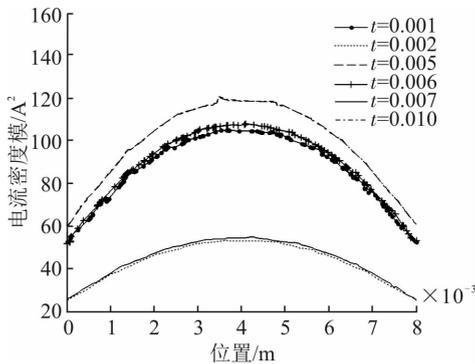


图 12 3 组对称位置的涡流强度

Fig. 12 Eddy current intensity in three symmetrical positions

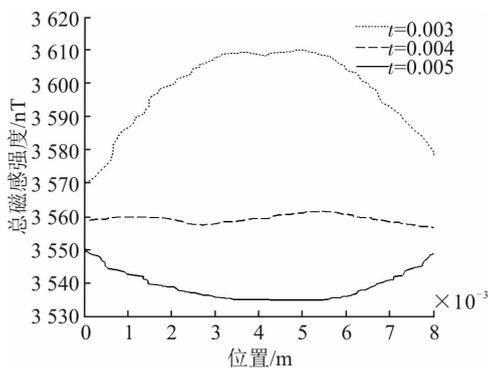


图 13 不同时刻的总磁感强度

Fig. 13 Total magnetic induction intensity at different moments

综上所述,可以得出以下结论:涡流磁场随着载体运动速度的增大而增强,而且其分布呈现中间强两边弱的态势分布,同时,其与外加磁场的大小成正比关系。研究表明载体在高速运动情况下,其涡流磁场是无法忽略的,因此为了实现高精度地磁导航,必须对涡流磁场加以消除和校正,同时对载体上安装的进行地磁测量的磁力仪而言,也必须对其安装位置进行优化设计,应尽量安装在两边,以减小其对涡流磁场的影响。

4 结语

针对载体干扰场中的涡流干扰磁场问题,采用 COMSOL Multiphysics 仿真软件建立了载体涡流干扰场的仿真模型。首先对模拟地磁场所采用的永

磁体的匀强场特性进行了研究,然后对载体在匀速转动以及摆动 2 种不同运动状态下的涡流磁场分布情况进行了仿真研究,明确了涡流干扰场对地磁测量的影响。仿真结果表明涡流磁场会随着载体运动速度的增大而增大,而且涡流磁场主要存在于载体的中间位置。仿真结果为下一步地磁导航中的误差建模以及磁场校正技术的研究提供了理论依据。

参考文献(References):

- [1] 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 Characteristic Quantities in Geomagnetic Matching[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2007, 28(1):42-47. (in Chinese)
- [2] 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.
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. (in Chinese)
- [3] 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 J, GE Z L, SHI G G, et al. Development and Key Technologies of Geomagnetic Navigation [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(5):1467-1472. (in Chinese)
- [4] WANG L J. Magnetic Sensors for Navigation Applications: An Overview[J]. Journal of Navigation, 2014, 67(2):263-275.
- [5] 李兴城,张慧心,张双彪. 地磁导航技术的发展现状[J]. 飞航导弹, 2013(10):80-83.
LI X C, ZHANG H X, ZHANG S B. Development Status of Geomagnetic Navigation Technology [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2013(10):80-83. (in Chinese)
- [6] 韦金芬. 地磁匹配导航的关键技术现状[J]. 电子质量, 2017, 37(1):108-110.
WEI J F. Key Technology Status of Geomagnetic Matching Navigation[J]. Electronics Quality, 2017, 37(1):108-110. (in Chinese)
- [7] 陈卓,田风勋,孙建军. 地磁导航关键技术研究进展综述[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(1):16-18.
CHEN Z, TIAN F Y, SUN J J. Review of Key Technologies in Geomagnetic Navigation[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2016, 39(1):16-18. (in Chinese)
- [8] GE Z, LIU S, LI G, et al. Error Model of Geomag-

- netic-Field Measurement and Extended Kalman-Filter Based Compensation Method[J]. *PloS One*, 2017, 12(4):e0173962.
- [9] XIANG C, BU X Z, QI K Y. Eddy Current Magnetic Field Model of Moving Projectile Based on Geomagnetic Gradient[J]. *Journal of Detection & Control*, 2013, 35(2):20-24.
- [10] 孙晓洁, 寇军, 张笑楠, 等. 地磁导航技术研究进展[J]. *导航与控制*, 2016, 15(6): 1317-1323.
SUN X J, KOU J, ZHANG X N, et al. Research Progress in Geomagnetic Navigation [J]. *Navigation & Control*, 2016, 15(6): 1317-1323. (in Chinese)
- [11] 于振涛, 吕俊伟, 稽绍康. 基于椭球约束的载体三维磁场补偿方法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2014, 35(6): 731-734.
YU Z T, LYU J W, JI S K. A Compensation Method for the Vehicle 3-D Magnetic Field Based on Ellipsoid Constraint[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2014, 35(6):731-734. (in Chinese)
- [12] GUO C, LI A, HONG C, et al. Algorithm for Geomagnetic Navigation and Its Validity Evaluation[C]// *IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering*. IEEE, 2011:573-577.
- [13] WANG Y, ZHANG J Y, ZHANG D W. Error Analysis and Algorithm Validation of Geomagnetic Sensor [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2015, 742(2): 21-26.
- [14] 李季. 地磁测量中载体干扰磁场特性及补偿方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2013.
LI J. Study on the Characteristics and Compensation Method of Vehicle Interferential Magnetic Field in Geomagnetic Measurement[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [15] 吴志添. 面向水下地磁导航的地磁测量误差补偿方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2013.
WU Z T. Research on Geomagnetic Measurement Error Compensation for Underwater Geomagnetic Navigation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [16] ZHANG Q, LI J, CHEN D X, et al. Method and Experiment for Compensating the Interferential Magnetic Field in Underwater Vehicle[J]. *Measurement*, 2014, 47(1):651-657.
- [17] 王鹏. 水下地磁导航适配性研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2014.
WANG P. Study on the Suitability of Underwater Geomagnetic Navigation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [18] 李季, 陈棣湘, 潘孟春, 等. 导航载体涡流磁场特性仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2013, 30(4):266-269.
LI J, CHEN D X, PAN M C, et al. Study on Eddy Current Magnetic Field of Navigation Vehicle Based on Finite Element Method [J]. *Computer Simulation*, 2013, 30(4):266-269. (in Chinese)
- [19] GEBRE-EGZIABHER D, ELKAIM G H, POWELL J D, et al. A Non-linear, Two-Step Estimation Algorithm for Calibrating Solid-State Strapdown Magnetometers[C]// *International St Petersburg Conference on Navigation Systems*. 2001:28-30.
- [20] 吕志峰, 贺浩, 张金生, 等. 仿真地磁的磁场模拟装置[J]. *电光与控制*, 2014, 21(6):76-80.
LYU Z F, HE H, ZHANG J S, et al. Magnetic Simulation Device for Simulating Geomagnetic Field [J]. *Electronics Optics & Control*, 2014, 21(6):76-80. (in Chinese)
- [21] LIU Y, LIU W, CHENG N. Magnetic Field and Eddy Current Analysis of Permanent Magnet Eddy Current Coupling[C]// *IEEE International Conference on Information and Automation*. IEEE, 2015:2817-2822.

(编辑:徐楠楠)