

磁通门传感器在低空亚音速飞行器 上应用的响应频率分析

卢兆兴, 王仕成, 张金生, 蔡欣华
(第二炮兵工程大学精确制导与仿真实验室, 西安 710025)

摘要: 对比分析常用磁传感器的性能指标, 得出磁通门传感器作为地磁导航磁测传感器的相对优势性。针对磁通门传感器在低空亚音速飞行器上应用的可行性, 从分析磁通门传感器的基本原理入手, 通过对某地实测磁异常场数据的频谱分析, 利用奈奎斯特抽样定理从响应频率方面对其在低空亚音速飞行器上应用的可行性进行验证, 并提出在低空亚音速飞行器上应用的响应频率指标, 即磁通门传感器的响应频率达到 40.8~68.0 Hz, 就能够满足其作为低空亚音速飞行器磁场数据采集前端的响应频率需求。

关键词: 磁通门传感器; 地磁导航; 频谱分析; 响应频率指标

中图分类号: V271.4; TP212.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)01-0059-04

Response Frequency Analysis of Fluxgate Sensor Applied to the Subsonic Low-Altitude Aircraft

LU Zhao-xing, WANG Shi-cheng, ZHANG Jin-sheng, CAI Xin-hua
(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: The relative advantages of fluxgate sensor applied to the geomagnetic navigation system were discussed by comparing its performance index with that of the commonly used magnetic sensors. The basic principle of the fluxgate sensor was analyzed. Then, Nyquist sampling theorem was used to verify the feasibility of the fluxgate sensor applied to the subsonic low-altitude aircraft by spectrum analysis to the measured magnetic anomaly data in a county. A frequency response indicator was proposed for applying to the subsonic low-altitude aircraft, i. e., when the response frequency of fluxgate sensor reach 40.8 Hz to 68.0 Hz, it will be able to satisfy the response frequency requirements.

Key words: fluxgate sensor; geomagnetic navigation; spectrum analysis; response frequency index

0 引言

地磁导航系统利用实测地磁场数据与地磁基准图进行匹配定位, 与惯导系统组合导航, 利用地磁匹配的长期稳定性弥补惯导系统的漂移误差, 利用惯导的短期高精度弥补地磁匹配易受干扰等不足, 从而达到提高组合导航定位的适应性和精度的效果^[1]。地磁传感器的磁场数据采集是提供实测磁场数据的来源, 也是实现地磁导航的关键技术之一^[2]。

磁通门传感器具有体积小、重量轻、灵敏度高、特

点, 已成熟应用于航空磁测等许多领域, 并已具有国产化研制的的能力。与磁阻和霍尔效应磁传感器相比, 磁通门传感器的灵敏度要高出 3~5 个数量级; 与核磁共振地磁仪相比, 磁通门传感器有较长时间的稳定性; 与光纤地磁仪相比, 它对被测磁场更敏感, 而对振动和热量带来的磁场变化则不敏感; 与分辨率最高的超导量子干涉仪相比, 磁通门传感器的成本低, 体积和功耗小, 技术成熟度高, 而且磁通门传感器不仅可以实现磁场的绝对测量, 又可以测量磁场方向^[3]。

从灵敏度、稳定性、体积、功耗、成本以及国内生产技术的成熟度来看, 磁通门传感器在作为地磁匹配导航磁测传感器的选择上具有相对优势, 但在亚音速飞行器上的应用对磁传感器的响应频率、精度、分辨率、工作环境温度提出了较高的要求, 其可行性还需要进一步验证, 其中一个重要方面即磁通门传感器的响应

收稿日期: 2013-01-22 修回日期: 2013-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(60904083, 61004128)

作者简介: 卢兆兴(1990—), 男, 山东莒县人, 硕士生, 研究方向为导航、制导与控制。

频率能否适应飞行器的飞行条件以有效地获取地磁场信号^[4]。

1 磁通门传感器的基本原理^[5]

磁通门现象是一种普遍存在的电磁感应现象,其主要原理是电磁感应和安培环路定理。磁通门传感器由铁芯外绕激励线圈和感应线圈组成。铁芯的基本要求是磁导率高、矫顽力小,且激励线圈上的激励电源频率要尽可能高。目前,铁芯一般采用一种软磁合金——坡莫合金。它的磁滞回线与一般铁磁物质的磁滞回线截然不同,对比如图1所示。

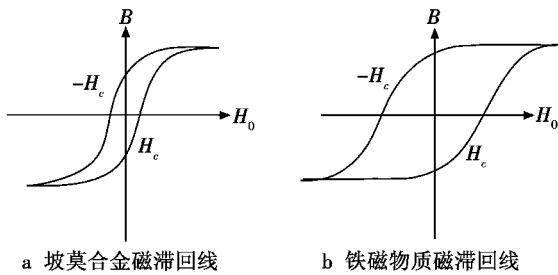


图1 不同物质磁滞回线对比

Fig. 1 The hysteresis loops of different materials

图中: H_0 表示外磁场强度; H_c 表示物质的磁感应强度。当外磁场 H 有微小变化时,在坡莫合金上会引起磁感应强度 B 显著变化,在感应线圈中则产生明显的感应电势。磁通门传感器正是基于铁芯材料磁化时的非线性特性来实现对外部磁场的测量。

为提高测量精度而需要差分信号输出,需要采用双铁芯传感器,目前一般采用跑道形结构,如图2所示。

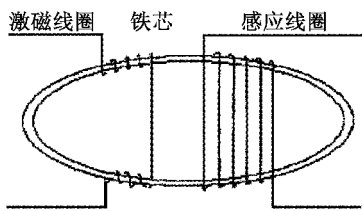


图2 磁通门双铁芯跑道形传感器结构图

Fig. 2 Dual core runway-shaped fluxgate sensor structure

两铁芯上缠绕的激励线圈反向串联,两铁芯激励电流的方向在空间中的任一时刻都是反向的,但是,环境磁场在两平行铁芯轴向分量是同向的。在形状尺寸和电磁参数完全对称的条件下,激励磁场在公共感应线圈中建立的感应电势互相抵消,它只起调制铁芯磁导率的作用,而环境磁场在感应线圈中建立的感应电势则互相叠加。

当激励线圈接上正弦激励电压时,通过激励线圈的电流产生激励磁场 $H = H_m \cdot \cos \omega t$,当激励磁场的振幅 H_m 略大于坡莫合金磁化饱和点 H_s 时,在环境磁场的作用下,会在感应线圈上产生急剧变化的偶次谐波

电压分量,其中,二次谐波电压 e_2 为主要成分, e_2 与环境磁场 H_0 有如下函数关系

$$e_2 = \frac{4E_m}{3\pi} \left\{ \left[1 - \left(\frac{H_s + H_0}{H_m} \right)^2 \right]^{(3/2)} - \left[1 - \left(\frac{H_s - H_0}{H_m} \right)^2 \right]^{(3/2)} \right\} \sin 2\omega t \quad (1)$$

式中: H_m 为激励磁场的振幅; H_s 为坡莫合金磁化饱和点; $E_m = \omega \cdot M \cdot S \cdot H_m \cdot \mu_0 \cdot \mu_A$,其中, ω 为激励电流的角频率, M 为感应线圈匝数, S 为坡莫合金截面积, μ_0 为真空磁导率, μ_A 为坡莫合金的磁导率。从式(1)中可以看出,磁通门传感器不仅能反映环境磁场的大小,而且还能反映磁场环境的方向特性。

2 磁异常信号的频谱分析

为了从响应频率方面对磁通门传感器在亚音速飞行器上应用的可行性进行分析和验证,必须首先分析和掌握磁通门传感器与地磁场数据之间的关系,所以要在频域上对实测得到的磁场数据进行频谱分析。地磁异常场包含较为丰富的地磁信息,空间结构极其复杂,且在时间上极其稳定,含有比大尺度主磁场更丰富的细节信息,特征体现更为明显^[6]。结合已有的实测数据,现在频域上对磁异常实测数据进行频谱分析。

2.1 频谱分析的基本原理

在频域上对磁异常信号进行频谱分析时,把磁异常信号在空间上的变化看作周期为无限大的周期函数。因此,可以将磁异常信号分解为不同频率的谐波信号,这些谐波信号并不是随时间变化的,而是随空间变化的。不同频率的谐波对应着不同的振幅和初相位,磁异常信号就等于这些谐波信号的叠加,这些谐波信号的振幅和初相位都是频率的函数,这种对应关系分别称其为振幅谱、相位谱,统称为频谱。

设对磁异常信号的实际测量为等间距测量,间隔为 Δx ,测量得到的一系列离散数据点为 $B(j\Delta x)$, $j = 1, 2, \dots, N-1, N$,其中, N 为磁异常数据的采样点数,则对磁异常信号进行傅里叶变换为

$$\frac{1}{L_x} T_B \left(\frac{n}{L_x} \right) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} B(j\Delta x) e^{-2\pi i \frac{jn}{N}}, \quad n = -\frac{N}{2}, \dots, 0, \dots, \frac{N}{2} \quad (2)$$

式中: $L_x = N\Delta x$,为测量磁异常场剖面长,即基本波长; $\frac{1}{L_x}$ 为基频,即频域中的采样间隔。

2.2 磁异常实测数据的频谱分析

研究的问题针对亚音速飞行器展开,以典型的亚音速飞行器为例,其飞行高度为200 m左右,巡航 Ma 数约为0.8。目前只获得了地表的实测数据,尚无200 m高度的航测数据。根据地磁学知识可知^[7],随着高度的增加,地壳磁场和电流感应磁场将被削弱,地表的磁场

变化比200 m高度的地磁场数据变化要复杂得多。所以,如果磁通门传感器能够在飞行器飞行条件下有效获取地面实测的磁异常信号,则其响应频率一定能够适应飞行器高度飞行条件。因此,可以从分析地面实测磁异常数据入手,对磁通门传感器在亚音速飞行器上应用的可行性进行验证。

本文选取的地磁数据为某地实测数据。该地属于山区形地貌特征,四周高山环绕,峡谷遍布,而且地下蕴藏着丰富的矿产资源,主要有煤矿、铁矿、有色金属矿、锌矿、非金属矿等。因此,该地的地磁实测数据包含了丰富的地磁信息,对该地区的实测数据进行频谱分析能够很好地反映出地磁场的频谱特性。

图3a和图4a分别给出了2011年该地实测得到的磁异常数据分布曲线,图3为南北方向,图4为东西方向。对磁异常数据进行频谱分析对应得到的频谱图如图3b和图4b所示。

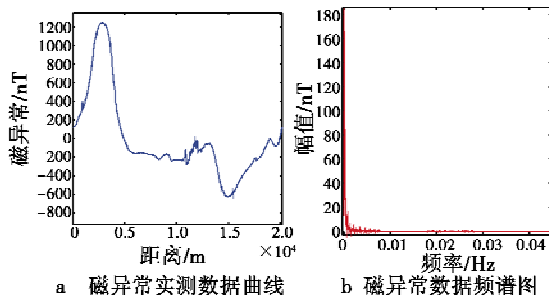


图3 南北方向磁异常信号及其频谱图

Fig.3 Magnetic abnormal signal and spectrum of south-north direction

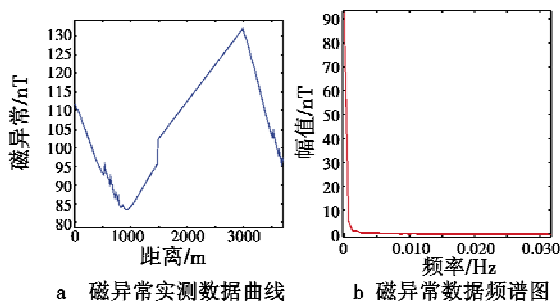


图4 东西方向磁异常信号及其频谱图

Fig.4 Magnetic abnormal signal and spectrum of east-west direction

在实际的磁测环境下,测量得到的磁异常场会叠加噪声、干扰等信号。大量的仿真试验证明,在实际的磁场测量中,幅值小于0.1 nT的信号将会淹没在噪声和干扰之中,通过滤波等方法滤除后,对实际的地磁匹配导航的效果不会产生影响^[8-11]。为了使得磁异常信号的频谱分析更有意义,只对磁异常信号频谱幅度大于0.1 nT的频率进行分析,这些频率的信号需要被磁

传感器探测和采集,是对地磁匹配导航有意义的谐波。

根据图3和图4中的数据可以得出,该地区通过实测得到东西方向上的有效磁异常信号的最高频率 $f_{\max 1}$ 为0.025826 Hz,南北方向上的有效磁异常信号的最高频率 $f_{\max 2}$ 为0.023561 Hz,对应的磁异常信号的最短波长分别为 $\lambda_{\min 1} = \frac{1}{f_{\max 1}} = 38.7 \text{ m}$, $\lambda_{\min 2} = \frac{1}{f_{\max 2}} = 42.4 \text{ m}$ 。

进一步分析和总结可以得出以下结论:1) 实际测量得到的磁异常数据是有误差的,其中一定叠加了噪声、干扰等信号,幅值小于0.1 nT的谐波信号将会淹没在噪声和干扰之中;2) 从频谱图来看,由于地磁特性相差最大的两个方向即东西方向和南北方向,磁测数据的频谱图在走向上是一致的,即谐波的幅值随频率的增加而急剧下降,高频部分的幅值非常小,可以认为在任意方向的频谱图都具有这一特性;3) 对于任意方向上磁异常数据的频谱分析,当谐波频率大于一定值后(对于该地区其值为0.025826 Hz),其对应谐波的幅值将小于0.1 nT,认为这些高频谐波在实际的地磁导航匹配中可以被滤除而不影响实际的匹配效果。

3 磁通门传感器在亚音速飞行器上的应用分析

根据奈奎斯特抽样定理,要使得抽样后的离散信号能够不失真地还原出原信号,则抽样频率必须大于或等于两倍信号谱的最高频率^[12]。所以磁通门传感器要正确敏感磁异常信号,其响应频率 f_0 必须大于或等于2倍地磁异常各谐波的最大频率 f_{\max} ,而在实际的工程应用中,则需保证 $f_0 \geq (3 \sim 5)f_{\max}$ 。

通过对磁异常信号的频谱分析可知,该地区通过实测得到的有效磁异常信号的最高频率 f_{\max} 为0.025826 Hz,对应的磁异常信号的最短波长 λ_{\min} 为38.7 m。运用相同的分析方法,对2011年在该地10个不同区域测量得到的地表磁异常信号进行频谱分析,得到各个地区的有效地磁异常场信号的最高频率 f_{\max} 与对应的最短波长 λ_{\min} ,如表1所示。

分析表1中的数据可以得出:在实际的地磁导航中,有意义的磁异常信号频谱范围在0.05 Hz以内。所以,在该飞行器实际飞行条件下,有意义的磁异常谐波的最短波长 λ_{\min} 为20 m。

由于飞行器的飞行 Ma 数为0.8,所以地磁异常谐波最短波长对应的飞行时间 t 为0.735294 s,对应的频率 f 为13.6 Hz。根据奈奎斯特抽样定理,结合实际的工程应用需要,磁通门传感器的响应频率应该满足 $f_0 = (3 \sim 5)f \approx 40.8 \sim 68.0 \text{ Hz}$ 。所以,在典型亚音速低空飞行器的地磁匹配导航系统的应用中,磁通门传感

器的响应频率需要达到 40.8 ~ 68.0 Hz, 才能够满足实际的应用需要。

表 1 2011 年某地区磁测数据的磁异常频谱分析
Table 1 Spectrum analysis of an area's measured magnetic data in 2011

地区序号	有效磁异常信号频谱的最大频率/Hz	最短波长/m
1	0.013050	76.6
2	0.023561	42.4
3	0.040584	24.6
4	0.031976	31.3
5	0.030643	32.6
6	0.044273	22.6
7	0.003173	315.1
8	0.041506	24.1
9	0.021317	46.9
10	0.016025	62.4

目前,国内研制的磁通门传感器的响应频率可以达到 100 Hz 以上,而进口磁通门传感器的响应频率可以达到 1 kHz。因此,结合亚音速低空飞行器的实际飞行高度和飞行速度,磁通门传感器在实际的应用过程中,其响应频率将不是制约其工程应用的关键因素,这也进一步验证了磁通门传感器在亚音速低空飞行器上应用的可行性。

由于磁通门传感器自身灵敏度和响应频率相对较高,对于干扰磁场(尤其是感应磁场)非常敏感。所以,在导航过程中,为了提高导航精度,需要尽量减少载体干扰磁场对磁测量带来的影响,主要的方法有以下 3 种:1) 分析磁场产生机理,建立飞行器的静态和动态干扰磁场(剩磁、感应磁场和涡流磁场)模型,将探头安装于干扰磁场影响最小部位,并实现干扰磁场数值补偿;2) 在飞行器上安装伸缩杆或拖拉绳,使传感器探头在工作时远离飞行器壳体,以此减少干扰磁场影响;3) 对于干扰磁场对称分布的飞行器,可以多点对称配置磁通门传感器,利用磁通门可以实现矢量测量的特点,通过数值计算的方法消除干扰磁场影响。

4 结束语

本文提供了一种验证磁测传感器在地磁导航中应用的可行性和确定响应频率指标的方法,该方法不仅适用于磁通门传感器,对于其他任何类型磁测传感器也同样适用,这将对实现磁测传感器在地磁导航中的工业化应用具有重要参考价值和实际意义。随着磁测仪器生产技术的不断发展以及对载体干扰磁场研究的不断深入,磁测传感器一定能够满足高灵敏度、高分辨率、小型化、低功耗、快速响应以及良好稳定性的性能要求,并能进一步提高地磁导航的适应性和导航精度,使得地磁导航能够成为一种广泛应用的导航手段。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 孙宁芹. 地磁匹配导航应用于巡航导弹的关键技术分析[J]. 飞航导弹,2011(10):66-70.
SUN N Q. The key technology analysis of geomagnetic navigation applied to the cruise missile[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2011(10):66-70.
- [3] 王向磊. 地磁匹配导航中几项关键技术研究[J]. 测绘工程,2011,20(1):1-5.
WANG X L. The survey of some key technology in geomagnetic matching navigation[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2011, 20(1):1-5.
- [4] 何静. 宽带低噪声磁通门传感器[D]. 西安:西北工业大学,2007.
HE J. The fluxgate sensor with wide band width and low noise [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [5] 郭爱煌,傅君眉. 磁通门技术及其应用[J]. 传感器技术,2000,19(4):1-4.
GUO A H, FU J M. Measurement technology of magnetic flux and its application[J]. Journal of Transducer Technology, 2000, 19(4):1-4.
- [6] 黄晓颖,边少锋. 国际高精度地磁模型研究进展[J]. 海洋测绘,2010,30(3):79-82.
HUANG X Y, BIAN S F. The research of international high-resolution geomagnetic models [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2010, 30(3):79-82.
- [7] 徐文耀. 地磁学[M]. 北京:地震出版社,2003:221-283.
XU W Y. Geomagnetism [M]. Beijing: Seismological Press, 2003, 4:221-283.
- [8] 王常虹,刘睿,李葆华. 地磁/天文自主导航算法[J]. 中国惯性技术学报,2010,18(4):429-433.
WANG C H, LIU R, LI B H. Autonomous navigation algorithm based on celestial and geomagnetism[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2010, 18(4):429-433.
- [9] 蔡洪,郭才发,胡正东. 惯性/地磁组合导航算法[J]. 中国惯性技术学报,2009,17(3):333-337.
CAI H, GUO C F, HU Z D. Algorithm for inertial/geomagnetic integrated navigation[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2009, 17(3):333-337.
- [10] 刘睿,董汉成,王常虹. 基于模糊自适应跟踪滤波的惯性/地磁组合导航方法[J]. 中国惯性技术学报,2011,19(3):329-334.

通道对偏流角产生影响。此外,俯仰角速度误差对像移速度的影响要明显大于滚动角速度的影响。

4 结论

本文针对高分辨率对地观测中存在的像移问题,基于矢量坐标转换的方法,建立了适用于星载和机载两种不同平台的高精度像移速度矢量计算模型。在该模型中考虑了地球扁率、姿态指向精度、姿态角速度误差等因素,并仿真分析了以上因素对像移速度矢量的影响。本文所建立的模型对实现对地观测相机的精密像移补偿、提高影像质量具有重要的应用价值。

参考文献

- [1] 林宗坚,李德仁,胥燕婴. 对地观测技术最新进展评述[J]. 测绘科学, 2011, 36(4): 5-8.
LIN Z J, LI D R, XU Y Y. General review on the new progress of earth observation[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(4): 5-8.
 - [2] 李晓云,杜伟. 星载 TDICCD 相机像移对成像质量的影响分析[J]. 航天器工程, 2011, 20(3): 51-55.
LI X Y, DU W. Analysis of image motion effect on satellite TDICCD camera image quality[J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(3): 51-55.
 - [3] 袁海燕,袁红艳,田国华. 航空遥感面阵 CCD 相机像移速度计算方法[J]. 黑龙江工程学院学报: 自然科学版, 2010, 24(1): 73-76.
YUAN H Y, YUAN H Y, TIAN G H. Calculation of image motion in CCD camera[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology: Natural Science Edition, 2010, 24(1): 73-76.
 - [4] 孙辉,张淑梅. 机载成像系统像移计算模型与误差分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2492-2499.
SUN H, ZHANG S M. Computation model and error budget for image motion of aerial imaging system[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2492-2499.
 - [5] 王跃明,王建宇. 星载光机扫描仪像移模型及补偿方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 952-957.
WANG Y M, WANG J Y. Imaging motion model and compensation methods of spaceborne opto-mechanical scanner[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 952-957.
 - [6] 贺东雷,曹喜滨. 三线阵 CCD 立体测绘卫星像移姿态跟踪补偿研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(10): 1744-1747.
HE D L, CAO X B. Image motion compensation of three-lines CCD camera stereo mapping satellite by attitude tracking[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(10): 1744-1747.
 - [7] 李伟雄,闫得杰,徐抒岩,等. 空间相机地心距误差修正[J]. 光学精密工程, 2012, 20(5): 1126-1133.
LI W X, YAN D J, XU S Y, et al. Modification of geocentric distance error of space camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(5): 1126-1133.
 - [8] 仲惟超. 航天器轨道和姿态参数对光学成像的影响分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
ZHONG W C. The effect analysis of spacecraft orbit and attitude parameters on optical imaging[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
 - [9] 庄绪霞. 平台运动对星载 TDICCD 相机成像质量影响分析与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
ZHUANG X X. The effect analysis and simulation of platform motion on image quality of spaceborne TDICCD camera[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
 - [10] 章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998.
ZHANG R W. Satellite orbit and attitude dynamics and control[M]. Beijing: Beihang University Press, 1998.
 - [11] 樊超,梁义涛,李伟,等. 偏流角对空间相机影响研究[J]. 光电与控制, 2008, 15(11): 76-79.
FAN C, LIANG Y T, LI W, et al. Study on influence of drift angle on the space camera[J]. Electronics Optics & Control, 2008, 15(11): 76-79.
 - [12] JANSCHKE K, TCHERNYKH V, DYBLENKO S. Performance analysis of opto-mechatronic image stabilization for a compact space camera[J]. Control Engineering Practice, 2007, 15(3): 333-347.
-
- (上接第 62 页)
- LIU R, DONG H C, WANG C H. Inertial/geomagnetic navigation system based on fuzzy adaptive strong tracking kalman filter[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(3): 329-334.
 - [11] 肖胜红,边少锋,黄晓颖. 总强度磁异常匹配水下导航方法研究[J]. 海洋测绘, 2011, 31(2): 17-20.
XIAO S H, BIAN S F, HUANG X Y. Research on the matching method of underwater geomagnetic navigation[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2011, 31(2): 17-20.
 - [12] 胡广书. 数字信号处理[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2003: 115-143.
HU G S. Digital signal processing[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 115-143.