

仿真地磁的磁场模拟装置

吕志峰, 贺浩, 张金生, 王仕成, 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: 基于亥姆霍兹线圈产生均匀磁场的特性, 绕制了三轴亥姆霍兹线圈, 通过改变3组线圈通电电流大小, 分别产生3个正交方向的磁场, 模拟地磁场强度, 为地磁导航系统的半实物仿真实验提供地磁场环境。同时, 就地磁导航半实物仿真的需求, 对地磁场模拟生成装置进行了可重复性和线性度验证实验、响应速度测量实验、均匀性验证实验和稳定性验证实验, 并建立了装置的输入输出模型, 验证了装置的各项指标符合实验室需求。

关键词: 地磁导航; 半实物仿真; 三轴亥姆霍兹线圈

中图分类号: V249.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)06-0076-05

A Magnetic Field Generating Device Used for Simulation of Magnetic Field

LÜ Zhi-feng, HE Hao, ZHANG Jin-sheng, WANG Shi-cheng, CAI Xin-hua

(Laboratory of Precision Guidance and Simulation, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: Based on the feature that Helmholtz coils can produce a uniform magnetic field, we made triaxial Helmholtz coils to generate magnetic fields with three orthogonal directions for simulating the geomagnetic field intensity by changing the importing electrical current of the three coils. This device could offer geomagnetic field environment for the hardware-in-the-loop simulation of geomagnetic navigation system. A lot of experiments were made to find whether this device is suitable for the need of simulation. These experiments included the tests on repeatability and linearity, and on response speed, uniformity and stability. The input/output model of the device was also established. These experiments proved that the indexes of the device can satisfy the needs of the laboratory.

Key words: geomagnetic navigation; hardware-in-the-loop simulation; three-axis Helmholtz coils

0 引言

地磁场是地球的固有资源^[1], 为航空、航天、航海提供了天然的坐标系。地磁导航是一种新型的导航方式, 它具有无源、全天候、能耗低等优良特性, 成为当前导航研究领域的热点。国内在地磁匹配导航技术上的研究起步较晚, 现在有关地磁导航的研究主要集中在仿真和预研阶段^[2], 其中对导航匹配算法的研究较多, 也较为成熟。

地磁导航的匹配算法需要在实际中检验, 但是试航费用昂贵, 试航之前需要做充分的试验, 比如虚拟仿真和物理仿真。物理仿真即利用地磁场模拟装置复

现磁传感器与地磁场的相对运动, 将飞行器上磁传感器在地磁场中的运动转化为地磁场相对于磁传感器的运动。在实验室仿真时, 可用计算的不同时刻飞行器位置在地磁场数据库中寻找对应的地磁场信息, 利用时序控制地磁场模拟装置产生相应的磁场, 使得安装于地磁场模拟装置内部的磁传感器能够敏感, 这样, 在较为真实的环境下, 可对地磁导航系统进行全面检验和诊断^[3-4]。然而国内关于地磁导航的物理仿真很少见, 地磁导航的室内实验环境建立还不完善。本文利用亥姆霍兹线圈能够产生均匀磁场的特性, 通过改变3组线圈通电电流大小, 分别产生3个正交方向的磁场, 模拟地球上各点地磁场强度, 为地磁导航系统的多重特征量匹配^[5]和角度类特征量匹配^[6]试验以及飞行器载体干扰磁场的补偿研究^[7]提供物理仿真的地磁场环境, 为实验室环境下的半实物仿真实验提供了条件。

收稿日期: 2013-07-08

修回日期: 2013-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(60904083, 61004128)

作者简介: 吕志峰(1989—), 男, 河北井陘人, 硕士生, 研究方向为导航、制导与控制。

1 亥姆霍兹线圈原理

亥姆霍兹线圈是一对相同的、共轴的、彼此平行的各有 N 匝的圆环电流,当它们的间距正好等于其圆环半径 R 时,称这对线圈为亥姆霍兹线圈。

根据毕奥—萨伐尔定理可知,在单个载流线圈的轴线上某点 P 的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{R^2 NI}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (1)$$

式中: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$; R 为线圈的半径; N 为线圈匝数; I 为通入的电流值; x 为圆心到点 P 的距离。

当两个线圈内的电流方向一致、大小相同、线圈之间的距离大小正好是线圈半径 R 时,它就能在其公共轴线中心附近产生较广的均匀磁场区,设 x 为亥姆霍兹线圈中轴线上某点离中心点 O 处的距离,如图 1 所示。

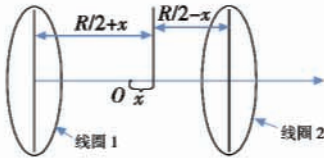


图1 线圈轴线上的磁场

Fig.1 Magnetic field on the axis of the coils

则亥姆霍兹线圈轴线上任意一点的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{R^2 NI}{[R^2 + (x + \frac{R}{2})^2]^{3/2} + [R^2 + (\frac{R}{2} - x)^2]^{3/2}} \quad (2)$$

而在亥姆霍兹线圈轴线中心点的磁感应强度 B 为

$$B = \frac{8}{5^{3/2}} \frac{\mu_0 NI}{R} \quad (3)$$

通过式(3)可以得出中心点 O 的磁场强度,而亥姆霍兹线圈的特点是能产生一定区域大小的均匀性较好的磁场,如图 2 所示,在轴线方向上,偏离中心点距离为 z 时的磁场强度为

$$B = B_z = \frac{8\sqrt{5}\mu_0 NI}{25R} \left[1 - \frac{144}{125} \left(\frac{z}{R} \right)^4 \right] \quad (4)$$

通过中心点且垂直于轴线的平面上,偏离中心点距离为 r 处的磁场强度为

$$B = B_r = \frac{8\sqrt{5}\mu_0 NI}{25R} \left[1 - \frac{36}{25} \left(\frac{r}{R} \right)^4 \right] \quad (5)$$

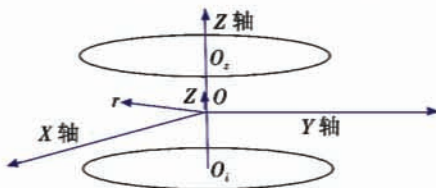


图2 线圈均匀磁场区域分析

Fig.2 Analysis on uniform magnetic field of the coils

由上面两式可以看出,亥姆霍兹线圈中心点附近的磁场随 z, r 做微小变化,但是当二者远远小于半径 R 时, $(\frac{z}{R})^4 \rightarrow 0, (\frac{r}{R})^4 \rightarrow 0$, 因此,亥姆霍兹线圈中心点附近的磁场可以近似看作是均匀磁场。

下面用 Matlab 对亥姆霍兹线圈产生的磁场进行分析^[8]。设一对相同规格的载流圆线圈的半径为 $R = 0.5 \text{ m}$,匝数为 $N = 100$,电流值为 $I = 0.3 \text{ A}$,则亥姆霍兹线圈和单线圈在轴线上的磁场分布如图 3 所示。可以看出,在图 1 中所示的轴线中心 O 点附近的磁场基本相等,是一个比较理想的均匀区。

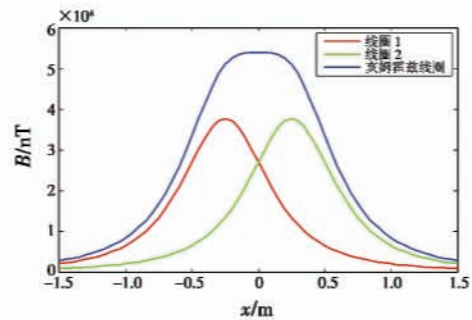


图3 亥姆霍兹线圈轴线上的磁场分布图

Fig.3 Magnetic field distribution of Helmholtz coils on the axis

2 实物加工

2.1 磁场模拟装置的总体设计

本装置内环用于产生地磁场 Y 分量,中环用于产生地磁场 X 分量,外环用于产生地磁场 Z 分量。考虑到材料对磁场的影响,采用有机玻璃材料^[9]用于加工线圈骨架,线圈骨架中间开槽,用于绕制漆包铜线,考虑到加工难度,采用粘接技术,两边用外半径相同的环形圈,中间夹一个外半径小于两边的环形圈,这样就形成了一定深度的槽,同时采用木质基座对内环和中环线圈进行固定。另外,外环水平放置的线圈用四根铝质支撑杆支撑^[10],保证水平。设计必须保证 3 对线圈轴线的中点重合,以三轴球心处作为试验区,将三轴磁通门传感器放置于球心处的无磁转台上,使三轴磁通门传感器的 X, Y, Z 3 个敏感轴方向分别与装置的中环、内环和外环轴线方向重合。

2.2 磁场模拟装置的结构参数设计

确定磁场模拟装置设计方案后,对于加工好的线圈,其半径已是一个固定值,通过各方向产生的最大地磁场值来确定各线圈的绕线匝数,本文预计在 3 个正交方向产生的最大磁场各为 20000 nT,线圈缠绕好后,要想改变生成磁场的强度,只需改变通电电流的大小即可。各项参数如表 1 所示。

表1 线圈结构参数表

Table 1 Structure parameters of the coils

	外环	中环	内环
线圈半径/mm	580	530	480
槽宽/mm	10	10	10
槽深/mm	20	20	20
实际缠绕匝数	129	118	107
理论产生最大磁场/nT	19998.9	20019.4	20044.1
电流分辨率/ μA		0.1	
磁场分辨率/nT	0.2	0.2	0.2

组装后的装置如图4所示。

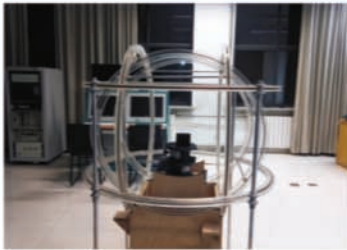


图4 组装后的装置

Fig. 4 The device assembled

3 磁场模拟装置研究及结果分析

实验室地磁导航半实物仿真要尽可能的真实,这就要求实验室内磁场模拟装置具有良好的可重复性和线性度、极高的精度、较高的实时性、较大的均匀区域以及长时间工作时仍然能稳定输出,为了检验装置在通电情况下生成模拟磁场的效果,本文进行了相关研究实验。在为线圈供电方面,使用中国计量科学研究院研制的SCS1001高精度稳定恒流源,其电流在正负0~100 mA范围内可调,电流调节精度为0.1 μA 。在磁场测量方面,使用武汉大学物理学院磁传感实验室生产的FGM2000三轴磁力计,将其放置在磁场模拟装置内部(即三轴球心处),通过RS232总线连接计算机,实时记录实验数据。另外,此仪器具有补偿背景磁场功能,即打开背景补偿开关,将背景磁场补偿掉,再对装置通电,这样就可以排除背景磁场的影响,观察装置生成的三轴磁场值。搭建的实验系统如图5所示。



图5 搭建的实验系统(右侧为恒流源和FGM2000)

Fig. 5 The experiment system (with the constant current source and FGM2000 on the right)

3.1 可重复性和线性度验证实验

首先验证单对线圈的可重复性,对3对线圈分别单独通 $\pm 10\text{ mA}$, $\pm 20\text{ mA}$, $\pm 30\text{ mA}$, $\pm 40\text{ mA}$, $\pm 50\text{ mA}$, $\pm 60\text{ mA}$, $\pm 70\text{ mA}$, $\pm 80\text{ mA}$, $\pm 90\text{ mA}$, $\pm 100\text{ mA}$ 的电流,重复测量3次,记录测量数据。

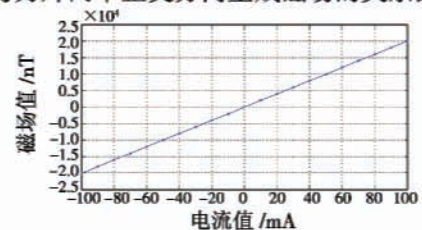
对各对线圈测得的3次数据取平均值,计算残差。由式(3)可知,装置仅一对线圈通电流时,输入和对应轴线方向的输出应当为正比关系,且在另外两个方向产生的磁场为0,但是,由于不可避免地存在各种误差,如线圈安装不可能绝对平行,线圈缠绕不平行等,造成输入输出关系并非理论上的线性关系,并且在另外两个方向也会产生偏差磁场。为体现可重复性的好坏,以内线圈数据为例,磁场偏离平均值最大不超过3 nT,如表2所示。可见,装置在同样的输入下可以得到相同的输出,具有很好的可重复性,能够满足地磁导航仿真实验需求。

表2 内线圈通电时3组测量值与平均值的最大残差

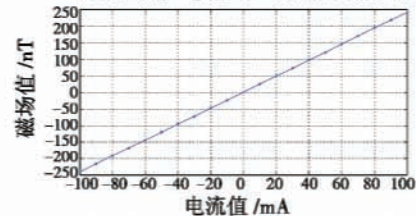
Table 2 The maximum residual error between measured value and average value when inside coils are switched on

	X方向	Y方向	Z方向
最大残差/nT	1.3	2.9	1.2
最大相对误差/%	0.33	0.02	0.41

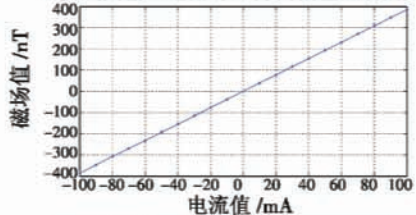
根据可重复性实验测得的数据,以最小二乘法拟合输入输出函数关系,拟合结果可以为该装置建立输入输出数学模型。图6为内线圈输入电流与轴线Y方向以及另外两个正交方向生成磁场的关系图。



a 内线圈输入电流与Y方向磁场的关系



b 内线圈输入电流与X方向偏差磁场的关系



c 内线圈输入电流与Z方向偏差磁场的关系

图6 内线圈输入电流与各方向产生磁场的线性关系图

Fig. 6 Linear relationship between current and magnetic field in each direction when inside coils are switched on

根据输入输出的线性关系,以电流 I 为输入、磁场值 B 为输出,建立单对线圈单独通电时轴线方向的输入输出模型和在另外两个方向产生偏差磁场的模型。

内线圈的数学模型为

$$\begin{cases} B_{内X} = 2.40I_{内} + 0.02 \\ B_{内Y} = 200.23I_{内} - 0.04 \\ B_{内Z} = 3.86I_{内} - 0.12 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $I_{内}$ 表示内线圈通电电流值,单位为 mA; $B_{内X}$ 、 $B_{内Y}$ 、 $B_{内Z}$ 表示内线圈通电时在 X 、 Y 、 Z 方向产生的磁场值,单位为 nT,其中 $B_{内Y}$ 为生成的所需要的磁场值,而 $B_{内X}$ 、 $B_{内Z}$ 为偏差磁场值。

同理,建立中线圈的数学模型

$$\begin{cases} B_{中X} = 199.91I_{中} - 0.1 \\ B_{中Y} = 3.61I_{中} + 1.07 \\ B_{中Z} = -1.45I_{中} - 0.46 \end{cases} \quad (7)$$

建立外线圈的数学模型

$$\begin{cases} B_{外X} = -0.55I_{外} + 0.32 \\ B_{外Y} = 3.35I_{外} - 1.30 \\ B_{外Z} = 200.02I_{外} + 0.16 \end{cases} \quad (8)$$

根据建立的3对线圈单独通电时的数学模型,由叠加原理可以得到装置3个方向的分量为

$$\begin{cases} B_x = B_{内X} + B_{中X} + B_{外X} \\ B_y = B_{内Y} + B_{中Y} + B_{外Y} \\ B_z = B_{内Z} + B_{中Z} + B_{外Z} \end{cases} \quad (9)$$

故装置3个方向产生磁场的耦合模型为

$$\begin{cases} B_x = 2.40I_{内} + 199.91I_{中} - 0.55I_{外} + 0.24 \\ B_y = 200.23I_{内} + 3.61I_{中} + 3.35I_{外} - 0.27 \\ B_z = 3.86I_{内} - 1.45I_{中} + 200.02I_{外} - 0.42 \end{cases} \quad (10)$$

此装置的目的在于通过输入电流模拟产生地磁场,因此要根据被模拟的地磁场确定输入电流的大小,这就要求对式(10)进行解耦,得到装置的解耦模型

$$\begin{cases} I_{内} = -0.000091B_x + 0.004997B_y - 0.000084B_z + 0.0013 \\ I_{中} = 0.005003B_x - 0.000060B_y + 0.000015B_z - 0.0012 \\ I_{外} = 0.000038B_x - 0.000097B_y + 0.005001B_z + 0.0021 \end{cases} \quad (11)$$

模型建立得是否正确需要进行验证。首先对单对线圈的模型进行验证,对各对线圈通入 ± 5 mA, ± 15 mA, ± 25 mA, ± 35 mA, ± 45 mA, ± 55 mA, ± 65 mA, ± 75 mA, ± 85 mA, ± 95 mA 的验证电流,测得磁场值,并与拟合曲线中对应输入电流的输出磁场值进行比较,检验与已建立模型的吻合程度。

仍以内圈为例,将内圈在验证电流输入时测得的实际磁场值分别与用式(3)计算得到的理论值和拟合计算值进行比较,如表3所示。其中, Y 向为内圈设计

产生磁场方向, X 、 Z 方向产生的磁场是由于结构误差、测量仪器误差和随机误差等产生的偏差磁场。

表3 内线圈拟合关系实验验证

Table 3 Validation on fitting relationship of the inside coils

输入电流/mA	Y向与理论值偏差/nT	Y向与拟合值偏差/nT	Y向与拟合值相对误差/%	X向与拟合值偏差/nT	Z向与拟合值偏差/nT
-95	22.5	0.45	0.002	0.01	0.42
-85	19.9	0.63	0.004	0.13	0.17
-75	18.1	0.20	0.001	0.21	0.03
-65	16.5	0.80	0.006	0.04	0.87
-55	14.2	0.91	0.008	0.21	1.22
-45	11.7	0.82	0.009	0.06	0.03
-35	8.8	0.34	0.005	0.70	0.27
-25	7.1	1.05	0.021	0.04	0.67
-15	4.1	0.47	0.016	0.20	0.13
-5	1.2	0.02	0.002	0.25	0.07
5	1.8	0.50	0.050	0.20	0.12
15	4.2	0.49	0.016	0.05	0.02
25	7.2	1.07	0.021	0.50	0.52
35	8.4	0.14	0.002	0.36	0.02
45	10.6	0.35	0.004	0.29	1.08
55	14.2	0.83	0.008	0.64	0.68
65	16.2	0.62	0.005	0.61	0.42
75	18.0	0.20	0.001	1.36	1.42
85	20.2	0.41	0.002	0.82	0.22
95	23.3	0.27	0.001	0.17	0.22

根据表3的数据来看,使用最小二乘法建立的单对线圈输入输出模型精度很高,设计产生磁场方向 Y 向验证数据的精度达到了0.05%的级别,同时,正交的另外两个方向 X 、 Z 的偏差磁场与拟合值的偏差不超过2 nT,是本系统随机误差的量级,所以能够很好地预测输入输出关系。

接下来验证解耦模型的正确性。假设需要模拟产生的地磁场为 $B_x = 10000$ nT, $B_y = 15000$ nT, $B_z = 13000$ nT,根据解耦模型,求得电流值为 $I_{内} = 72.9543$ mA, $I_{中} = 49.3238$ mA, $I_{外} = 63.9401$ mA,将其通入装置中,测得线圈产生的真实值为 $B_x = 10002.4$ nT, $B_y = 15002.8$ nT, $B_z = 12997.2$ nT,最大偏差不超过3 nT,由此可见,三轴亥姆霍兹线圈产生的磁场精度极高,能够满足半实物仿真的精度要求。

这里要着重说明的是,模型是在装置和探头位置都不变的前提下建立的,但是装置搬动后,或者探头挪动后,就会使探头的3个敏感轴和装置的3轴的关系发生变化,因此,如果位置发生变动,要按照上述方法重新建立其数学模型。

3.2 响应速度测量实验

由于此装置本质上是电感很大的线圈模型,所以装置的输出相对于输入有一定延时,这时磁场值以曲线变化过渡,其值不可以用作探头采样值。因此,要使

装置能够用于地磁导航的半实物仿真,必须考虑装置的响应速度,以确定采样延迟时间,确保磁探头能够采样到“真实”的地磁场值。

在实验中,测量每对线圈的最大响应时间,即线圈从磁场正向最大值稳定到反向最大值稳定所需的时间。本文利用 FGM2000 磁力计与计算机连接,以 10 Hz 频率记录磁场值。控制 SCS1001 高精度稳定恒流源,通过其面板上电流换向按钮使电流激励从 100 mA 变为 -100 mA,每对线圈记录 20 次响应时间,读取其中时间间隔最大值作为最大响应时间。统计数据见表 4。

表 4 各对线圈响应时间
Table 4 Response time of the coils

	内圈	中圈	外圈
平均响应时间/s	0.47	0.46	0.52
最大响应时间/s	0.7	0.6	0.7

从数据上来看,装置响应实时性较差,因此,在地磁导航半实物仿真时可以参考此数据,通过延时采样减小装置输出延时造成的影响。

3.3 均匀性验证实验

亥姆霍兹线圈在中心点附近能产生均匀磁场,这是其重要特性。利用这一特性,在放置三轴磁力计探头时,只需尽量使探头三轴与模拟磁场生成装置三轴重合,而不用刻意追求探头摆放位置十分严格,如果探头在磁场均匀区域范围内,那么测量磁场值就不会出现太大偏差。

以内线圈为例,通入电流 $I = 100$ mA,测量其轴向 Y 方向的均匀区域的大小。以中心点为原点,沿着线圈轴线方向,磁探头向前移动距离为正,向后移动距离为负,每隔 1 cm 测量一次并记录磁场值,测量数据如表 5 所示。

表 5 内线圈轴向磁场均匀性实验数据
Table 5 Data of magnetic field uniformity experiment of inside coils

距离 x /cm	-4	-3	-2
磁场值/nT	20014.1	20015.7	20017.9
距离 x /cm	-1	0	1
磁场值/nT	20020.1	20021.7	20019.5
距离 x /cm	2	3	4
磁场值/nT	20017.2	20016.3	20013.9

由表 5 的数据可以看出,在最大通电电流 $I = 100$ mA 的情况下,沿着轴线方向偏离中心点 4 cm,磁场值变化不超过 8 nT,以中心点处的磁场值为标准,其相对误差不超过 0.04%,磁场的均匀性很好。

3.4 稳定性实验

实验之前,经过测量,实验区域背景磁场相当稳定,因此可以排除背景磁场对本实验的影响。依次对内、中、外 3 对线圈通电,检验装置产生磁场的稳定性。

以内线圈的轴线 Y 方向为例,取输入 $I = 100$ mA,采样计时 3 min,将采样数据导入 Matlab 软件中作图,其相对起始时刻数值变化如图 7 所示。

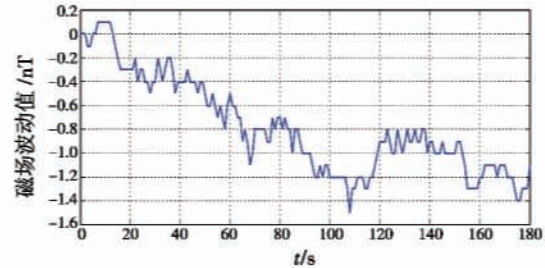


图 7 内圈输入电流恒定时在 Y 方向的磁场波动图
Fig. 7 Fluctuation of magnetic field in Y direction when current of inside coils is constant

由图 7 曲线可看出,3 min 内线圈产生的磁场变化很小,其波动值不超过 1.5 nT,可见装置能够产生足够稳定的磁场,满足实验室仿真需求。

4 结论

根据实际需求,本文做了相应实验,通过实验发现:装置的可重复性和线性度很好,同时,基于此建立了装置的数学模型,并验证了模型的正确性,使装置达到了万分级的精度;实时性较差,但是在进行半实物仿真时可以通过延迟采样加以克服;生成磁场的均匀性良好且很稳定。因此,磁场模拟装置能够满足实验室地磁导航半实物仿真的需求。

但是,受实验室设备条件限制,高精度恒流源的量程仅为 100 mA,要想完全模拟地磁场,还需使用更高量程的恒流源;另外,由于装置或探头挪动会引起数学模型的改变,为了建模方便快捷,还需要编写相应的自标程序,实现模型系数自标定,使装置更加完善。

参考文献

- [1] 徐文耀. 地磁学[M]. 北京:地震出版社,2003.
XU W Y. Geomagnetism[M]. Beijing:Seismological Press, 2003.
- [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.
- [3] 赵晨光,郑昌文. 航天仿真技术综述[J]. 军事运筹与系统工程,2009,23(3):78-80.
ZHAO C G, ZHENG C W. Review of aerospace simulation technology[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2009, 23(3):78-80.

(下转第 107 页)

- [3] 谷荣亮. 交互式电子技术手册在武器装备保障中的应用分析[J]. 飞航导弹, 2013(3):57-60.
GU R L. The application analysis of IETM in military equipment support [J]. Winged Missiles Journal, 2013(3):57-60.
- [4] MIL-STD-1388-2B “DOD Requirements for alogistic support ananlysis record” [S]. United States Department of Defense, 1991.
- [5] 英特尔软件学院教材编写组. 多核多线程技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2011.
Teaching Materials Writing Group of Intel Software College. Multicore multithread technology [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2011.
- [6] S1000D Issue 4.0. International specification for technical publications[S]. 2008.
- [7] 吴吉祥, 夏靖波, 杜华桦. 多线程技术在电子水平状态指示仪中的应用[J]. 航天控制, 2010, 28(1):74-77.
WU J X, XIA J B, DU H H. The application of multithreading technology in aircraft EHSI [J]. Aerospace Control, 2010, 28(1):74-77.
- [8] 倪海燕, 马常旺, 胡超. 基于多线程技术的智能小区管理服务系统构建[J]. 宁波大学学报: 理工版, 2006, 19(1):110-113.
NI H Y, MA C W, HU C. An architecture of intelligent residence management service system based on multithreading technology [J]. Journal of Ningbo University: Natural Science and Engineering Edition, 2006, 19(1):110-113.
- [9] 洪月华. 基于模糊综合评价的课堂教学质量数据挖掘[J]. 计算机科学, 2008, 35(2):154-156.
HONG Y H. Data mining for classroom teaching quality based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Computer Science, 2008, 35(2):154-156.
- [10] 薄瑞峰, 李瑞琴. 模糊数据 envelopment 分析法在产品方案评价中的应用[J]. 机械设计与研究, 2011, 27(3):17-23.
BO R F, LI R Q. Application of fuzzy data envelopment analysis model in concept evaluation of mechanical product [J]. Machine Design and Research, 2011, 27(3):17-23.
- (上接第 80 页)
- [4] 王红强, 金海强, 杨涛. 磁线圈对地磁场的物理模拟及对地磁导航研究的意义[J]. 地震地磁观测与研究, 2010, 31(3):1-6.
WANG H Q, JIN H Q, YANG T. Physical simulation of geomagnetic field by use of magnetic coils and its significance to the research of geomagnetic navigation [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2010, 31(3):1-6.
- [5] 陈励华, 王仕成, 乔玉坤, 等. 基于多重特征量的地磁场匹配导航[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(7):14-17.
CHEN L H, WANG S C, QIAO Y K, et al. Multi-element matching in geomagnetic location [J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36(7):14-17.
- [6] 王向磊. 地磁匹配导航中匹配量的选择[J]. 测绘工程, 2011, 20(5):1-3.
WANG X L. The selection of geomagnetic matching parameter in geomagnetic matching navigation [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2011, 20(5):1-3.
- [7] 李永慧, 张晓明, 陈国彬, 等. 某常规弹载体感应磁场分布的仿真技术研究[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(4):181-184.
LI Y H, ZHANG X M, CHEN G B, et al. The study on simulation technology of vehicle's inductive magnetic field distribution for a projectile [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(4):181-184.
- [8] 罗兴垅. 圆环电流及亥姆霍兹线圈磁场的一种数值解法[J]. 赣南师范学院学报, 2006(3):91-93.
LUO X L. On the numerical solution of magnetic field of a circular current and Helmholtz coil [J]. Journal of Gannan Normal University, 2006(3):91-93.
- [9] 易晓柯. 亥姆霍兹线圈的制作和测试[J]. 实验科学与技术, 2005(10):171-172.
YI X K. Manufacture and test of Helmholtz coils [J]. Experiment Science and Technology, 2005(10):171-172.
- [10] 宋继红. 垂直三分量磁场发生器[J]. 长春大学学报, 2010, 20(6):56-58.
SONG J H. Vertical three-component magnetic field generator [J]. Journal of Changchun University, 2010, 20(6):56-58.