

DOI:10.13203/j.whugis.20180280



文章编号:1671-8860(2021)01-0118-07

模糊决策理论的地磁图适配性分析

种 洋^{1,2,3} 柴洪洲¹ 刘 帆⁴ 王 旭¹ 杜祯强¹

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

2 军事科学院战争研究院,北京,100091

3 地理信息工程国家重点实验室,陕西 西安,710054

4 61365部队,天津,300143

摘要:传统地磁图适配性分析仅将单一特征参数作为评价指标,从而导致分析结果不全面。针对此问题,提出了一种基于模糊决策理论的地磁图适配性分析方法。首先采用地磁标准差、粗糙度、相关系数、坡度标准差及地磁信息熵等5个主要特征参数作为模糊指标进行加权分析,得到综合评价以评定候选区适配性。然后基于地磁异常的无迹卡尔曼滤波算法,选取中国南海部分海域的全球地磁异常格网数据作为地磁异常基准图进行仿真实验。实验结果表明,该方法具有较高的可靠性,综合评价可作为地磁图适配性分析的定量依据,并能从一定程度上解决单一特征参数评价不全面的问题,提高水下自主航行器的导航精度。

关键词:模糊决策理论;地磁匹配导航;适配性;特征参数

中图分类号:P228

文献标志码:A

长航时高精度自主导航是发展水下自主航行器亟待解决的技术难题。惯性导航系统(inertial navigation system,INS)作为水下航行器的核心导航设备之一,因其存在随时间变化产生的累积误差,无法满足水下航行器长航时自主导航的高精度要求。地磁导航技术可以为水下航行器提供高隐蔽性的外部校正信息,修正由INS产生的累积误差^[1-3]。地磁辅助惯性导航系统涉及到背景磁场构建、地磁导航匹配算法和地磁适配性分析等多项关键技术。适配性是指地磁图对匹配的适应性,即地磁场特征在相关匹配中能够表征地理位置的能力。通过对地磁图适配性的分析,挑选地磁特征显著、信息量丰富、适应性强的区域作为地磁适配区,能够有效提高地磁导航精度^[4-7]。

为了解决多指标对单一决策的综合影响,目前已有诸多研究提出了分析方法,文献[8]提出了多属性决策评价地磁适配性的方法,该方法综合考虑地磁标准差、地磁粗糙度、地磁相关系数、地磁信息熵4个特征参数得到综合评价,与匹配概率有较高的一致性;文献[9]提出了分形维数的评价方法,该方法从原理上分析了分形维数

与适配性的关系,发现分形维数在适配性分析上具有很好的性能;文献[10]提出了基于粗糙集理论的地磁特征参数的选取方法,该方法能为适配区评价选取重要特征参数;文献[11]针对人为提取的特征不能客观描述深层次结构性特征的问题,提出了基于深度卷积神经网络的适配性分析方法,可以有效避免地磁特征人工提取的主观性;通过对地磁共生矩阵反演出的角二阶矩、对比度等统计参数的分析,文献[12]提出了基于地磁共生矩阵的地磁适配区选择算法,从多方向反映地磁变化特征以及地磁邻近区域的相关性;文献[13]提出了层次分析方法,定义了地磁场特征参数可信度,分析了特征参数的隐含信息,发现可信度比单一特征参数适配性评价效果更好。从定量角度可以将上述方法归纳为基于决策选优的适配性分析方法,排序和选优的思想是此类方法最显著的特征。通过排序来明确各候选适配区适配性能的优劣,选优即选取适配性能好的区域作为适配区,然而这类方法存在人为设置阈值和判定准则难提取两个缺点。因此,为了使提取的准则更为客观,本文将模糊决策理论应用到

收稿日期:2019-07-16

项目资助:国家自然科学基金(41774021,41774037,41904039,42074014);地理信息工程国家重点实验室开放基金(SKLGIE 2017-M-2-6)。

第一作者:种洋,博士,主要从事地磁导航关键技术和地磁场建模方面的研究。chongyang_geodesy@outlook.com

通讯作者:柴洪洲,博士,教授。chaih1969@163.com

地磁图适配性分析中。

模糊决策理论是运用模糊数学方法处理多目标决策问题,在分析过程中,这些多目标变量属于模糊因素^[14]。本文基于地磁图适配性分析中存在多指标性和模糊性的特点,提出了基于模糊决策理论的地磁图适配性分析方法,对特征参数的模糊度指标进行加权分析,构建综合评价值来评定候选区适配性。针对地磁异常的无迹卡尔曼滤波(unscented Kalman filtering, UKF)算法,选取中国南海部分海域的全球地磁异常格网数据(earth magnetic anomaly grid 2, EMAG2)作为地磁异常基准图进行仿真实验,验证了定量分析结果的可靠性和该方法的可行性。

1 地磁图特征参数定义

本文将地磁场数据以格网的形式存储于计算机中,用离散点的形式表示地磁场在空间中的变化规律。设某地磁场区域的经纬度跨度为 $M \times N$ 网格(M 为纬度跨度, N 为经度跨度), $f(i, j)$ 为网格点坐标 (i, j) 处的地磁异常值。描述地磁图适配性的特征参数多达十几种,根据地磁图特征参数与匹配概率的关联程度,本文选取地磁标准差、粗糙度、相关系数、坡度标准差和地磁信息熵作为评价候选匹配区适配性能的度量。上述5个地磁图特征参数的定义及其计算方法如下^[15]。

1) 地磁标准差 σ

地磁标准差反映了该区域地磁场离散程度和地磁场总体起伏情况。地磁标准差数值越大,表示该候选匹配区的地磁特征越明显,越适合做地磁匹配。其定义如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{MN-1} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f(i, j) - \bar{f})^2} \quad (1)$$

式中, $\bar{f} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i, j)$,表示候选匹配区内地磁场的均值。

2) 地磁粗糙度 r

地磁粗糙度反映了候选匹配区地磁场的平均光滑程度和地磁场局部起伏状态。地磁粗糙度越大,表示该候选匹配区的地磁信息量越丰富,越有利于进行地磁匹配。其定义如下:

$$r = \frac{r_x + r_y}{2} \quad (2)$$

$$r_x = \sqrt{\frac{1}{M(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} [f(i, j) - f(i, j+1)]^2} \quad (3)$$

$$r_y = \sqrt{\frac{1}{(M-1)N} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^N [f(i, j) - f(i+1, j)]^2} \quad (4)$$

式中, r_x 表示该区域 x 方向粗糙度; r_y 表示该区域 y 方向粗糙度。

3) 相关系数 ρ

地磁相关系数反映了地磁数据之间的独立性。地磁相关系数越小,表明该区域地磁信息越丰富,越有利于地磁匹配定位。定义如下:

$$\rho = \frac{\rho_x + \rho_y}{2} \quad (5)$$

$$\rho_x = \frac{1}{M(N-1)\sigma^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} [f(i, j) - \bar{f}] \cdot [f(i, j+1) - \bar{f}] \quad (6)$$

$$\rho_y = \frac{1}{(M-1)N\sigma^2} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^N [f(i, j) - \bar{f}] \cdot [f(i+1, j) - \bar{f}] \quad (7)$$

式中, ρ_x 表示该区域 x 方向的相关系数; ρ_y 表示该区域 y 方向的相关系数。

4) 坡度标准差 S

地磁坡度 $S(i, j)$ 为地磁场曲面上一点处的法线方向和垂直方向的夹角,可由地磁场在纬度方向、经度方向的变化率 $S_x(i, j)$ 、 $S_y(i, j)$ 确定,其定义如下:

$$S_x(i, j) = [f(i+1, j+1) + f(i, j+1) + f(i-1, j+1) - f(i+1, j-1) - f(i, j-1) - f(i-1, j-1)]/6 \quad (8)$$

$$S_y(i, j) = [f(i+1, j+1) + f(i+1, j) + f(i+1, j-1) - f(i-1, j+1) - f(i-1, j) - f(i-1, j-1)]/6 \quad (9)$$

$$S(i, j) = \sqrt{[S_x(i, j)]^2 + [S_y(i, j)]^2} \quad (10)$$

地磁坡度 $S(i, j)$ 是针对候选匹配区中每一个格网点而言的,为了能够反映整个候选匹配区的地磁坡度情况,引入坡度标准差 S_σ ,其定义如下:

$$S_\sigma = \sqrt{\frac{1}{(M-2)(N-2)-1} \sum_{i=2}^{M-1} \sum_{j=2}^{N-1} (S(i, j) - \bar{S})^2} \quad (11)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{(M-2)(N-2)} \sum_{i=2}^{M-1} \sum_{j=2}^{N-1} S(i, j) \quad (12)$$

5) 地磁信息熵 H

地磁信息熵越小,代表地磁场特征越独特,该区域越有利于进行地磁匹配定位。其定义如下:

$$H = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N p(i,j) \cdot \log_2 p(i,j) \quad (13)$$

$$p(i,j) = \frac{f(i,j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i,j)} \quad (14)$$

当对数的底数取2时,熵的单位为bit。

2 基于模糊决策理论的地磁图适配性分析

为了综合考虑地磁标准差、粗糙度、相关系数、坡度标准差及地磁信息熵等5个特征参数对适配性分析的影响,首先构建指标矩阵,然后构建隶属度矩阵对这5种不同类属的特征参数进行模糊控制,最后引入权重向量进一步提高综合评价矩阵的合理性^[16-17]。

1) 构建指标矩阵 X

设有 m 块待选区域,有 n 个评价指标来描述,则有 $m \times n$ 阶指标矩阵,其定义如下:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} = (x_{ij})_{m \times n} \quad (15)$$

式中, x_{ij} 表示第 i 个待分析对象的第 j 个评价因素的指标特征量, $i = 1, 2 \cdots m, j = 1, 2 \cdots n$ 。

2) 指标归一化

隶属度 r'_{ij} 的计算如下:

$$r'_{ij} = \begin{cases} x_{ij}/x_{\max}, & \text{越大越优型} \\ x_{\min}/x_{ij}, & \text{越小越优型} \end{cases} \quad (16)$$

式中, x_{\max} 表示 x_{ij} 的最大值; x_{\min} 表示 x_{ij} 的最小值。

地磁标准差、地磁粗糙度、地磁坡度属于越大越优型,相关系数及地磁信息熵则属于越小越优型。由于各属性的量纲和取值范围相差较大,需要将不同属性的量纲进行标准化处理,使标准化转换后的评价价值 r_{ij} 均值为0,方差为1。计算如下:

$$r_{ij} = \frac{r'_{ij} - m_j}{\sigma_j} \quad (17)$$

$$m_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r'_{ij} \quad (18)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (r'_{ij} - m_j)^2} \quad (19)$$

式中, m_j 为第 j 个属性的均值; σ_j 表示第 j 个属性值的标准差。

3) 多目标模糊关联矩阵的构造

根据式(14)构建指标隶属度矩阵 $R_{m \times n}$, 其定

义如下:

$$R_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中, $i = 1, 2 \cdots m; j = 1, 2 \cdots n$ 。

4) 权重向量的确定

由于各指标对适配性的影响程度各不相同,为实现综合评价结果的合理性,必须对各指标进行加权处理,定义权向量 w 为:

$$w = (w_1, w_2 \cdots w_m) = \left(\frac{s_1}{\sum_{i=1}^m s_i}, \frac{s_2}{\sum_{i=1}^m s_i}, \cdots, \frac{s_m}{\sum_{i=1}^m s_i} \right) \quad (21)$$

$$s_i = \exp \left[\mu \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n |r_{ij} - r_{ik}| / (1 - \mu) - 1 \right] \quad (22)$$

式中, μ 代表平衡系数 ($0 < \mu < 1$)。

5) 综合评判矩阵

将式(21)所得权重矩阵与式(20)所得隶属度矩阵组合构成综合评判矩阵 V , 其定义如下:

$$V = wR = (w_1, w_2 \cdots w_m) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (23)$$

3 数据计算及结果评定

本文选取分辨率为 $2''$ 的全球地磁异常格网数据 EMAG2, 将范围为 $108^\circ\text{E} \sim 113^\circ\text{E}$ 、 $10^\circ\text{N} \sim 15^\circ\text{N}$ 的中国南海部分海域地磁异常格网数据作为实验的地磁异常基准图,如图1所示,该地区的地磁图特征样式繁多,很难直观对各区域的适配性优劣作出直接判断。

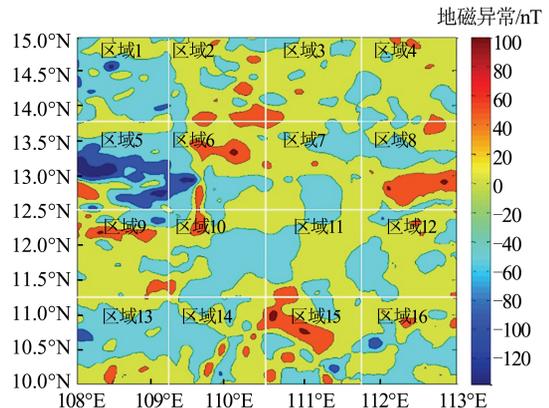


图1 地磁异常示意图

Fig. 1 Geomagnetic Anomaly Grid Map

将图 1 所示区域等间隔划分为 16 个候选匹配区域,以便进行计算及结果分析,候选匹配区域 1~16 的地磁图特征参数统计量见表 1,表 1 同时给出了相应地磁图特征参数的数值大小排序

结果。

由式(15)~(23)求解可得各适配区的综合评定结果,根据计算值大小对各区域适配性优劣进行排序,结果如表 2 所示。

表 1 单一地磁图特征参数值及其排序

Tab.1 Rank Results of Single Geomagnetic Map Feature Parameter

区域编号	标准差 σ		粗糙度 r		相关系数		坡度标准差 S		信息熵 H	
	数值/nT	排序	数值	排序	数值	排序	数值	排序	数值/bit	排序
1	4.144 9	9	0.933 9	12	0.992 1	5	1.342 2	10	10.112 7	5
2	3.520 3	11	1.530 7	3	0.977 2	14	1.856 7	6	10.014 2	13
3	4.374 3	8	1.771 3	2	0.994 7	3	2.304 1	2	9.823 9	16
4	3.708 0	10	1.131 8	8	0.991 6	6	1.432 7	8	10.113 7	4
5	4.409 5	7	0.960 3	10	0.987 8	8	1.094 6	13	10.180 2	1
6	2.698 5	14	0.866 9	13	0.987 3	9	1.274 9	11	10.024 0	12
7	6.987 7	2	1.049 4	9	0.996 0	1	1.481 2	7	10.000 0	14
8	4.459 7	5	0.845 5	14	0.994 4	4	0.969 7	14	10.150 5	2
9	2.649 9	15	2.067 4	1	0.960 9	15	2.829 0	1	10.041 4	10
10	2.865 5	12	1.286 5	5	0.984 2	11	1.861 3	4	10.059 7	8
11	2.753 5	13	0.392 0	16	0.985 5	10	0.602 6	16	10.092 6	6
12	4.416 4	6	1.247 4	6	0.978 6	13	1.857 8	5	10.031 4	11
13	2.552 3	16	0.935 5	11	0.958 7	16	1.242 5	12	9.943 1	15
14	7.359 4	1	1.339 9	4	0.995 2	2	1.908 8	3	10.062 0	7
15	4.815 8	4	0.742 0	15	0.990 8	7	0.896 8	15	10.041 8	9
16	5.330 5	3	1.158 5	7	0.983 6	12	1.414 7	9	10.117 2	3

表 2 各候选匹配区综合评定值及其排序

Tab.2 Rank Results of Candidate Matching Regions

区域编号	综合评定值	排序	区域编号	综合评定值	排序
1	2.033 5	10	9	4.170 7	1
2	2.774 0	6	10	2.775 5	4
3	3.431 6	2	11	0.954 0	16
4	2.165 1	8	12	2.775 1	5
5	1.680 1	13	13	1.869 3	12
6	1.927 8	11	14	2.872 6	3
7	2.291 1	7	15	1.394 1	15
8	1.499 8	14	16	2.144 4	9

由表 1 可知,若分别以地磁粗糙度、地磁坡度作为评价依据,9号区域适配性最好;若以地磁信息熵作为评价依据,3号区域适配性最优。由此可知,利用单一特征参数作为评价依据所得结果并不一致。因此,单一地磁图特征参数作为候选匹配区适配性评价依据进行分析存在不合理性,而基于模糊决策理论能够综合主要特征参数进行加权分析,构建出综合评价值来评定候选匹配区的适配性。

为了验证基于模糊决策理论的地磁图适配性评估方法所得综合评定结果的正确性和可靠性,本文采用基于地磁异常的 UKF 滤波算法,选取 16 个候选匹配区当中的 9 号(排序 1)、4 号(排

序 8)和 11 号(排序 16)3 块区域进行仿真实验。在航迹仿真实验中,设置了航迹 1 和航迹 2 两条航迹进行验证分析。水下自主航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)的运动状态如下:先进行匀加速运动,再匀速运动,然后转弯,最后变成匀速状态。惯导航迹仿真参数设置如表 3 所示,区域 9、4、11 的仿真航迹结果分别如图 2、图 3、图 4 所示。

表 3 仿真参数设置

Tab.3 Simulation Parameter Setting

参数	参数值
惯性导航初始经度误差/n mile	2
惯性导航初始纬度误差/n mile	2
陀螺零偏/($^{\circ}$ ·h $^{-1}$)	0.01
加表零偏/(m·s $^{-2}$)	1×10^{-5}
AUV 匀速运动速度/(n mile·h $^{-1}$)	9.7
AUV 偏航角/($^{\circ}$)	50
AUV 航行时间/h	10.29
惯性导航初始状态方差/($^{\circ}$) 2	0.001
地磁图噪声方差/(nT) 2	10
地磁测量噪声方差/(nT) 2	10

综合两条航迹,对 9 号、4 号以及 11 号候选匹

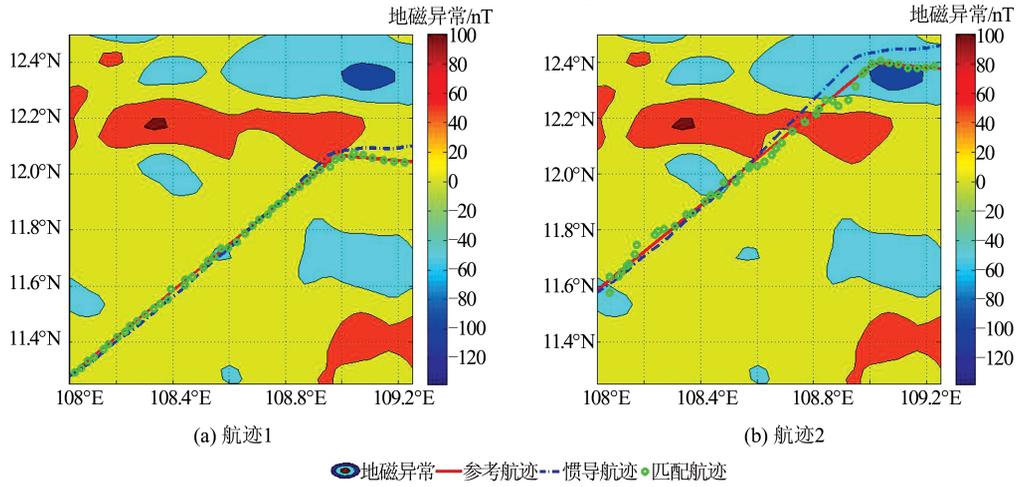


图2 9号区域仿真航迹

Fig.2 Matching Track of Region 9

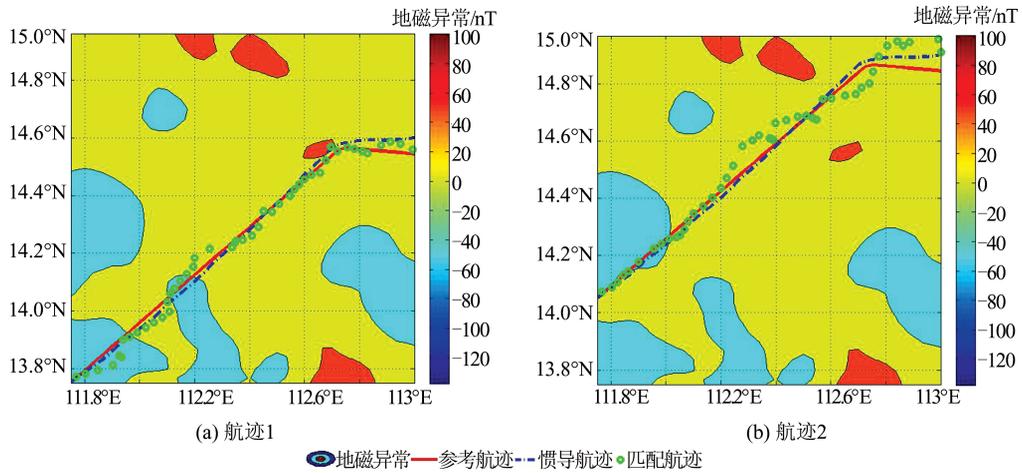


图3 4号区域仿真航迹

Fig.3 Matching Track of Region 4

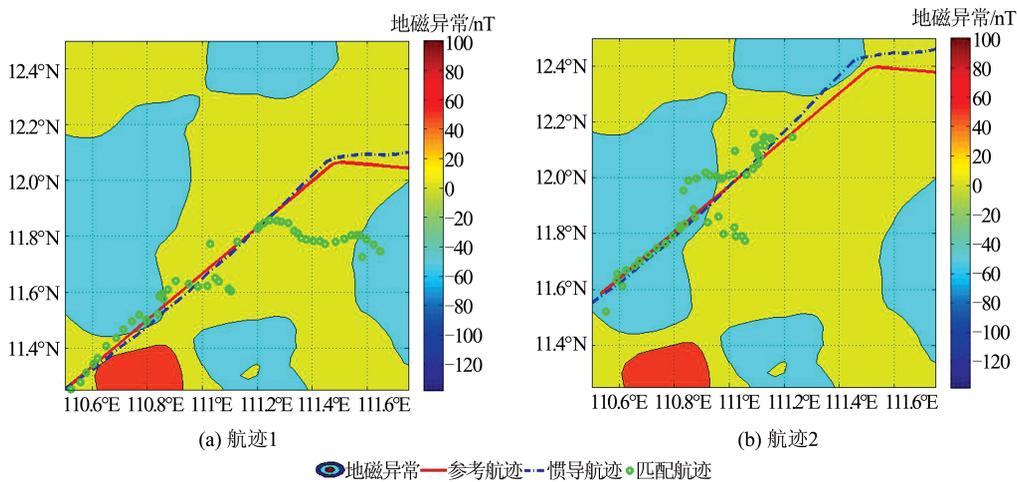


图4 11号区域仿真航迹

Fig.4 Matching Track of Region 11

配区分别沿经度和纬度方向对基于UKF滤波方法的绝对匹配误差进行统计,结果如表4所示。

由图2~4可知,9号区域较4号区域的匹配

航迹更接近真实轨迹,11号区域则在匹配过程中出现误匹配现象。由表4仿真实验结果可得,综合评价价值更高的区域,纬向和经向绝对匹配误差

也越小。实验结果表明,综合评价价值高的区域其适配性能更好,可以选取相应区域作为适配区。

表 4 绝对匹配误差统计值

Tab.4 Statistics of Absolute Matching Errors

方向	编号	最大值 /n mile	最小值 /n mile	平均值 /n mile	均方误差 /n mile
纬向	9	1.869 6	0.003 1	0.935 7	0.332 0
	4	4.493 2	0.003 2	2.332 3	2.186 0
	11	18.897 5	0.028 6	10.584 4	6.002 7
经向	9	1.375 1	0.009 8	0.892 8	0.384 7
	4	4.895 4	0.010 2	2.707 0	2.133 4
	11	12.907 7	0.106 5	8.146 9	5.899 1

4 结 语

本文提出了基于模糊决策理论的地磁图适配性分析方法,对图 1 中的各个候选匹配区的适配性进行定量分析,得出综合评价价值作为评价依据,并且进行航迹仿真实验验证了该方法的可靠性。实验结果表明,基于模糊决策的地磁图适配性分析结果与仿真实验结果具有较好的一致性,且综合评价价值越高,匹配效果越好。且该方法解决了仅依据单一评价指标进行分析的不全面问题,得出综合评价价值作为地磁图适配性优劣评判的定量分析依据,对航迹规划问题也具有一定指导意义。

参 考 文 献

- [1] Zheng H, Wang H, Wu L, et al. Simulation Research on Gravity-Geomagnetism Combined Aided Underwater Navigation[J]. *Journal of Navigation*, 2013, 66(1):83-98
- [2] Goldenberg F. Geomagnetic Navigation Beyond the Magnetic Compass [C]. Position, Location, and Navigation Symposium, Coronado, CA, USA, 2006
- [3] Wang P, Hu X, Wu M. Matching Suitability Analysis for Geomagnetic Aided Navigation Based on an Intelligent Classification Method [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2014, 228(2):271-283
- [4] Wang P, Hu X, Wu M. A Hierarchical Decision-Making Scheme for Directional Matching Suitability Analysis in Geomagnetic Aided Navigation[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2014, 228(10):1 815-1 830
- [5] Liang Y, Xu Q Y. A Suitability Evaluation Method Based on Fractal Dimension in Geomagnetism Matching Navigation [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 588(11):994-997
- [6] Wang L, Yu L, Qiao N, et al. Analysis and Simulation of Geomagnetic Map Suitability Based on Vague Set [J]. *Journal of Navigation*, 2016, 69(5):1 114-1 124
- [7] Qiao Y K, Wang S C, Zhang J S, et al. Surface Spline Based Constructing Method for Geomagnetic Reference Map [C]. International Conference on Information and Automation, Zhuhai, China, 2009
- [8] Wang Peng, Wu Meiping, Ruan Qing, et al. Application of Multi-Attribute Decision Method in Analysis of Geomagnetic Map Suitability [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2011, 30(8):65-68(王鹏, 吴美平, 阮晴, 等. 多属性决策方法在地磁图适配性分析中的应用 [J]. 兵工自动化, 2011, 30(8):65-68)
- [9] Chen Yourong, Yuan Jianping. Research on Matching Suitability of Geomagnetism Map Based on Fractal Dimension [J]. *Flight Dynamics*, 2009, 27(6):76-79(陈有荣, 袁建平. 基于分形维数的地磁图适配性研究 [J]. 飞行力学, 2009, 27(6):76-79)
- [10] Wang Zhe, Wang Shicheng, Zhang Jinsheng, et al. A Method of Selection Matching Suitability Characteristic Parameter Based on Rough Set Theory in Geomagnetism Matching Guidance [J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(3):1 057-1 063(王哲, 王仕成, 张金生, 等. 一种地磁匹配制导适配性特征参数选取方法 [J]. 宇航学报, 2009, 30(3):1 057-1 063)
- [11] Xiao Jing, Qi Xiaohui, Duan Xiusheng, et al. Direction Matching Suitability Analysis for Geomagnetic Navigation Based on Convolutional Neural Network [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39(10):1 584-1 590(肖晶, 齐晓慧, 段修生, 等. 基于深度卷积神经网络的地磁导航方向适配性分析 [J]. 工程科学学报, 2017, 39(10):1 584-1 590)
- [12] Zhao Jianhu, Wang Shengping, Wang Aixue. Study on the Selection of the Geomagnetic Adaptable Matching Area Based on the Geomagnetic Co-occurrence Matrix [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(4):446-449(赵建虎, 王胜平, 王爱学. 基于地磁共生矩阵的水下地磁导航适配区选择 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(4):446-449)
- [13] Wang Zhe, Wang Shicheng, Zhang Jinsheng, et al. A Matching Suitability Evaluation Method Based on Analytic Hierarchy Process in Geomagnetism Matching Guidance [J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(5):1 871-1 878(王哲, 王仕成, 张金生, 等. 一种基于层次分析法的地磁匹配制导适配性评价方法 [J]. 宇航学报, 2009, 30(5):1 871-1 878)

- [14] Ma Yueyuan, Ouyang Yongzhong, Qu Zhenghao, et al. Selection Criteria of Gravity Aided Navigation Area Based on Fuzzy Decision Theory[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2016, 36(6):7-10 (马越原, 欧阳永忠, 曲政豪, 等. 基于模糊决策理论的重力辅助导航区域选择方法[J]. 海洋测绘, 2016, 36(6):7-10)
- [15] Hu Xiaoping. Technologies on Underwater Geomagnetic Field Navigation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013(胡小平. 水下地磁导航技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2013)
- [16] Sridharan M. Fuzzy Mathematical Model for the Analysis of Geomagnetic Field Data [J]. *Earth Planets and Space*, 2009, 61(10):1 169-1 177
- [17] Yang C. Study on Multi-temporal Vector-Spatial Object Matching Methods Based on Fuzzy Theory [C]. International Conference on Communication Software and Networks, Xi'an, China, 2011

Suitability Analysis of Geomagnetic Map Based on Fuzzy Decision Theory

CHONG Yang^{1,2,3} CHAI Hongzhou¹ LIU Fan⁴ WANG Xu¹ DU Zhenqiang¹

1 Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

2 Institute of War, Academy of Military Sciences, Beijing 100091, China

3 State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054, China

4 Troops 61365, Tianjin 300143, China

Abstract: In order to solve the problem that the traditional suitability analysis of geomagnetic map only uses a single characteristic parameter as the evaluation index, which results in incomplete analysis results, a method of the suitability analysis of geomagnetic map based on fuzzy decision theory is proposed. Firstly, five main characteristic parameters, such as geomagnetic standard deviation, roughness, correlation coefficient, slope standard deviation and geomagnetic information entropy, are used as fuzzy indexes for weighted analysis, and the comprehensive evaluation value is obtained to evaluate the suitability of candidate areas. Then, based on the unscented Kalman filtering algorithm of geomagnetic anomaly, the earth magnetic anomaly grid 2 (EMAG2) model of part of the south China sea is selected as the geomagnetic anomaly reference map for the simulation experiment. The experimental results show that our proposed method has high reliability, and the comprehensive evaluation value can be used as a quantitative basis for the suitability analysis of geomagnetic map, and the optimal matching position can be obtained.

Key words: fuzzy decision theory; geomagnetic matching navigation; suitability; characteristic parameters

First author: CHONG Yang, PhD, specializes in the key technology of geomagnetic navigation and geomagnetic field modeling. E-mail: chongyang_geodesy@outlook.com

Corresponding author: CHAI Hongzhou, PhD, professor. E-mail: chaihzh1969@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41774021, 41774037, 41904039, 42074014); the Open Funds of State Key Laboratory of Geo-information Engineering (SKLGIE 2017-M-2-6).

引文格式: CHONG Yang, CHAI Hongzhou, LIU Fan, et al. Suitability Analysis of Geomagnetic Map Based on Fuzzy Decision Theory[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(1):118-124. DOI:10.13203/j.whugis20180280(种洋, 柴洪洲, 刘帆, 等. 模糊决策理论的地磁图适配性分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(1):118-124. DOI:10.13203/j.whugis20180280)