

# 一种基于层次分析法的地磁匹配制导适配性评价方法

王 哲<sup>1</sup>, 王仕成<sup>2</sup>, 张金生<sup>2</sup>, 乔玉坤<sup>2</sup>, 陈励华<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院战略导弹工程系, 烟台 264000; 2. 第二炮兵工程学院制导与仿真实验室, 西安 710025)

**摘 要:** 针对基于单一地磁场特征参数进行匹配区适配性评价易出现误判的现象, 提出了一种基于层次分析法的适配性评价方法。通过对大量试验数据分析, 定义了可信度的概念, 分析了4种常用地磁场特征参数与匹配概率之间的可信度, 发现单一特征参数不能作为适配性评价的有效依据; 从分析地磁场特征参数隐含的信息入手, 提出一种基于层次分析法的适配性评价方法, 以实现有效评价适配性的目的; 基于上述方法在选定区域进行了适配性评价实验。通过数据分析发现: 利用本文提出的方法进行适配性评价结果, 与匹配仿真实验所得结果具有良好的 consistency, 可信度较之基于单一地磁场特征参数的适配性评价效果改善明显。

**关键词:** 地磁匹配制导; 适配性评价; 层次分析法; 可信度

**中图分类号:** TJ 765.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1328(2009)05-1871-08

**DOI:** 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.05.021

## 0 引言

地磁匹配制导是最近提出的一种新型制导方式, 它同重力导航、地形导航一样, 是一种自主、隐蔽的导航技术。其基本原理是: 把预先规划好的导弹航迹上某段区域内点的地磁场特征量绘制成基准图(或称参考图), 存储在弹上计算机中, 当导弹飞越这段区域时, 由弹上磁测量设备实时测量出飞越点的地磁场特征量, 构成实时图, 在弹上计算机中与基准图进行相关匹配, 确定导弹的实时坐标位置, 供制导计算机实时修正弹道, 达到制导的目的。

地磁匹配制导因具有无源、全自主、无辐射、体积小、能耗低、价格便宜等优良特性而备受关注, 国内多家单位在对该课题开展研究。课题组前期研究发现, 地磁匹配制导的定位效果不仅与匹配算法有关, 还与匹配区的适配性有很大关系, 对于地磁匹配算法, 目前已有不少文献发表, 而如何评价适配性尚未见文献公开报道, 但适配性的有效评价又是地磁匹配制导走向工程化必须解决的问题。本文在分析大量实验数据基础上, 提出一种基于层次分析法的适配性评价方法, 目的在于解决如何有效评价适配性的问题。

## 1 基于单一地磁场特征参数的适配性评价

### 1.1 地磁场特征参数

适配性是有限匹配区的一种性质, 该性质体现了特定区域提供导航位置修正信息的能力, 这种信息用于采用地磁匹配制导技术的飞行器惯导系统进行位置修正。

目前, 用于描述地磁场适配性的特征参数有十几种, 究竟哪些参数可以更好地指示适配性一直是研究的热点和难点。本文主要目的是综合利用多种特征参数信息以提高适配性评价的正确率, 另外考虑到篇幅的因素, 这里从地磁场特征参数的定义出发, 将特征参数分为: 宏观起伏特征和微观破碎特征, 其中各选取两种最具有代表性的特征参数作为研究对象, 尽管这种做法没有涵盖全部适配性特征参数, 但是这对于验证本文提出方法的有效性已经足够了, 基于更多特征参数的适配性评价方法与本文方法是完全一致的。需要说明的是特征参数计算是在已经制备好的地磁匹配制导基准图(以下简称基准图)上进行的, 这里基准图采用网格矩阵的方式存储, 制图特征量为地磁场总强度, 大小为  $m \times n$  网格,  $F(i, j)$  为坐标  $(i, j)$  处的地磁场总强度值,  $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$ 。

1.1.1 标准差

标准差计算公式为:

$$\sigma_T = \left( \frac{1}{mn-1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [F(i,j) - m_T]^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

$m_T$  为选定区域基准图的均值:

$$m_T = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n F(i,j) \quad (2)$$

标准差  $\sigma_T$  反映了基准图元素的离散程度和整个区域地磁场起伏程度,属于描述地磁场宏观起伏特征的特征参数。如果基准图上地磁场总强度是均匀的,即非起伏的,则基准图标准差小,这样匹配时就难以找到正确的匹配点,也就是说基准图标准差越大,诸元素越离散,起伏程度越大,特征越明显,越容易实现准确匹配。

1.1.2 分形维数

分形学是一门以非规则几何形态为研究对象的几何学,是由美国数学家曼德勃罗于 1973 年首次提出的。分形维数之所以能够指示适配性,是由于分形具有一个最明显的特征——自相似性,Mandelbrot 在 1982 年指出:从统计学意义上讲,一般的二维随机粗糙面在一定的标尺之间存在着自相似性,它具有分形的特征。从这个结论可以看出,像地形表面、地磁场等,在起伏方差一定的情况下,其表面的分形维数大小与粗糙度有关,分形维数越大,基准图粗糙度越大,特征越明显,越容易实现准确匹配。分形维数描述了地磁场的微观破碎特征,对地磁场的细微变化有很好的分辨力。

自相似参数  $H$  与分形维数  $D$  之间存在如下关系:

$$D = E + 1 - H \quad (3)$$

式中,  $E$  为欧氏空间维数,本文中,  $E = 2$ 。

文献[5]给出一种比较实用的自相似参数计算方法。设基准图大小为  $M \times M$ , 定义归一化尺度向量  $NSR = [1, 2, \dots, M]$ , 并定义归一化点对向量

$$NPN = [n_{pn}(1), n_{pn}(2), n_{pn}(3), \dots, n_{pn}(M)] \quad (4)$$

其中,  $n_{pn}(k)$  表示基准图上中两点之间距离  $\Delta r$  满足条件  $k \leq \Delta r < k + 1$  的点对数目,定义归一化多尺度地磁场总强度差向量

$$NMSID = [ndi(1), ndi(2), ndi(3), \dots, ndi(M)] \quad (5)$$

其中

$$ndi(k) = \frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} |f(x + \Delta x(k), y + \Delta y(k)) - f(x, y)|}{n_{pn}(k)} \quad (6)$$

表示两点之间距离  $\Delta r$  满足如下条件

$$k \leq \Delta r < k + 1, \Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (7)$$

的所有点对的绝对差的平均值。以  $\lg(ndi(k))$  为纵坐标,  $\lg(k)$  为横坐标,进行最小二乘拟合,则直线

$$\lg(ndi(k)) = H \lg(k) + C \quad (8)$$

的斜率就是自相似参数  $H$ , 根据式(3)可以求出分形维数  $D$ [5]。

1.1.3 累加梯度

定义基准图  $x, y$  方向的累加梯度为:

$$\begin{aligned} T_x(i, j) &= \sum_{i=0}^m (F(i+1, j) - F(i, j)) \\ T_y(i, j) &= \sum_{i=0}^n (F(i, j+1) - F(i, j)) \end{aligned} \quad (9)$$

则基准图累加梯度为:

$$T = \frac{(T_x + T_y)}{2} \quad (10)$$

累加梯度反映了基准图的信息量大小,累加梯度越大,基准图包含的信息量越大,越容易实现准确匹配。累加梯度,能够比较有效地描述地磁场的复杂度,属于宏观描述地磁场特征的参数。

1.1.4 绝对值粗糙度

绝对值粗糙度定义为:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= (Q_x + Q_y) / 2 \\ Q_x &= E |F(i, j) - F(i, j+1)| \\ Q_y &= E |F(i, j) - F(i+1, j)| \end{aligned} \quad (11)$$

绝对值粗糙度  $\sigma_z$  反映整个区域平均光滑程度,刻画细微的局部起伏,是一种描述地磁场细微变化的参数。绝对值粗糙度越大,在视觉上“粗糙”感越强,基准图的特征越明显,越容易实现准确匹配。

1.2 基于单一特征参数的适配性评价

选定 84 块区域的基准图分别计算了上述 4 种特征参数,并进行了匹配仿真试验,通过定义可信度的概念,分析了其评价效果,基准图制图特征量为地磁场总强度,大小为  $16 \times 16$  网格,网格间距为 100m。

1.2.1 可信度定义及其分析

在基于单一特征参数对适配性进行评价时,一般先设定阈值,根据特征参数是否达到阈值来判断该区域是否适合匹配,但这种做法容易出现两种错误:(1)该区域适合进行匹配,但其特征参数未达到阈值;(2)该区域不适合进行匹配,但其特征参数达到了阈值。为了定量地描述某种特征参数对适配性评价的效果,量化这两种错误,定义了可信度概念:

定义 2:设  $k$  块待选匹配区中某特征参数  $C_i$  的阈值为  $L_c$ , 匹配概率  $P_i$  阈值为  $L_p (i = 1, 2, \dots, n)$ , 待选匹配区中满足  $\{(P_i \geq L_p) \cap (C_i \geq L_c)\}$  或  $\{(P_i < L_p) \cap (C_i < L_c)\}$  的匹配区数量为  $z$ , 则该特征参数对适配性评价的可信度为:

$$B_f = \frac{z}{k} \quad (12)$$

4 种特征参数与选定的 84 块区域匹配仿真试验分布示意图如图 1 所示,具体数据见表 1,这里需要说明四个问题:

(1) 为消除量纲的影响,图中的各特征参数均经过了标准化处理(具体做法见 2.2)。

(2) 匹配概率是由匹配仿真试验获得的,所用方法为积相关算法(PROD),该方法利用基准图上矢量  $X(u, v)$  和实时图上矢量  $Y(u, v)$  之间夹角  $\theta$  的某函数(如  $\cos\theta$ )来度量两图之间的相似程度,数学表达式为:

$$R(u, v) = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{i+u, j+v} Y_{i, j} \quad (13)$$

(3) 地磁匹配基准图和实时图之间的误差来源主要有:传感器固有噪声、传感器温差变化、不同传感器畸变、数据采集的条件、地磁的长期变化、地磁的短期变化。考虑到导弹速度很快,完成一次匹配

的时间很短,虽然变化的幅度大且形态复杂,但其持续时间长和全球同步性好(在一个匹配区域内对该区域的影响近似相同)的特点,使得可以用基准噪声来近似其影响。

地磁场的长期变化非常缓慢,幅度较小,如果加快基准图的数据更新周期或者对基准图数据进行长期变化修正,对地磁测量数据的影响很小;传感器的选择、温度变化和数据采集条件在不同情况下地磁测量数据的影响是不同的,很难用某种噪声模型进行近似描述,其影响也相对较小,因此将除地磁场的短期变化之外的误差用常见的高斯噪声、均匀噪声来近似。

综上所述,可以基准噪声、高斯噪声和均匀噪声作为总的噪声模型,以测量数据作为基准图,以测量数据加上噪声模拟实时图,不失一般性,本文仿真匹配试验所用实时图是由基准图叠加噪声生成,噪声包括:10nT 的基准噪声、5nT 的均匀噪声、10nT 的高斯噪声。

(4) 惯导误差设定为  $0.02^\circ/\text{h}$ , 换算为位置偏移约为  $1.8\text{km}/\text{h}$ , 磁传感器采样频率为  $5\text{Hz}$ , 由此可确定匹配区图幅大小为  $16 \times 16$  网格,其中网格间距  $100\text{m}$ , PROD 算法相关长度取为 12。

1.2.2 基于单一特征参数评价适配性的效果

依据标准差、分形维数、累加梯度、绝对值粗糙度 4 种特征参数的适配性评价的可信度分别为  $0.5060$ 、 $0.4881$ 、 $0.5357$ 、 $0.5357$ ,也就是说如果基于标准差对一块区域进行适配性评价所得结果是适合匹配的话,那么该区域在实际匹配中也适合匹配的概率仅有  $0.5060$ ,如此大的误判概率是不能满足实际需求的,因此单一特征参数不能够作为适配性评价的有效依据。

表 1 4 种特征参数可信度数据  
Table 1 Four characteristic parameter reliability

分布	参数			
	方差	分形维数	累加梯度	绝对值粗糙度
$P_i \geq L_p$	54	54	54	54
$C_i \geq L_c$	24	21	31	33
$(P_i \geq L_p) \cap (C_i \geq L_c)$	18	16	23	21
$(P_i < L_p) \cap (C_i < L_c)$	24	25	22	24
可信度( $B_f$ )	0.5060	0.4881	0.5357	0.5357

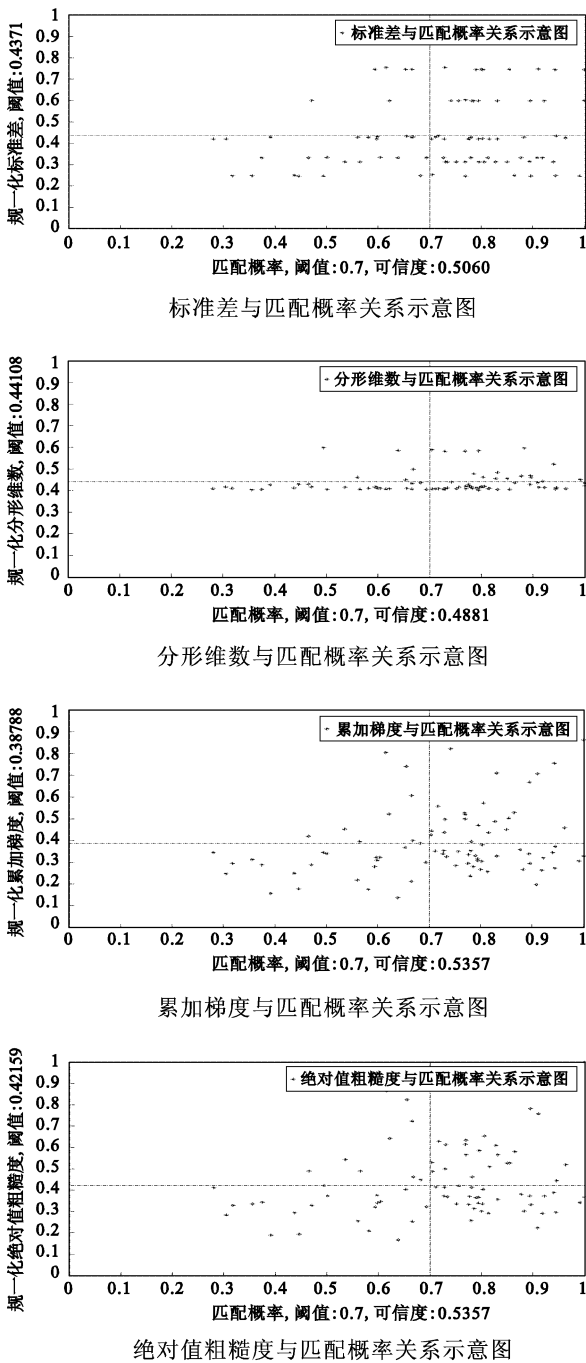


图 1 特征参数与匹配概率分布示意图

Fig.1 Distribution map between characteristic parameter and matching probability

## 2 基于层次分析法的适配性评价方法

如上所述,基于单一地磁场特征参数不能有效评价适配性,分析其原因主要在于单一的地磁场特征参数包含的“信息量”有限,利用有限的信息得到的结论的可信度必将受到怀疑。那么能否找到一种方法可以综合利用多种的磁场特征参数的某种信

息,到达有效评价适配性的目的?

### 2.1 层次分析法

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是系统评价 (System Evaluation, SE) 中一种常用的方法,所谓的系统评价就是对研究问题所构成的系统的各要素在总体上进行分类和排序,从数学变换的角度看,各评价对象是由评价对象各指标所组成的高维空间的一些点,系统评价模型就是一种从高维空间到低维空间的映射,要求这种映射能尽可能反映评价对象样本在原高维空间中的分类信息和排序信息,这些信息具体反映在如何合理地确定这些评价指标的权重上,这仍是目前系统评价模型研究的难点之一。在近年来提出的确定权重的主要方法中,层次分析法得到了广泛应用,主要原因在于它将人的主观判断为主的定性分析进行量化,将各种判断要素之间的差异数值化,帮助人们保持思维过程的一致性,适用于复杂的评价系统。

AHP 在实用中存在的主要问题是构造、检验和修正判断矩阵的一致性问题,和计算判断矩阵各要素的权重,目前已提出的处理方法的主要问题是主观性强、修正标准对原判断矩阵而言不能保证是最优的、或只对判断矩阵的个别元素进行修正。文献 [6] 中提出用基于加速遗传算法 (Accelerating Genetic Algorithm, AGA) 提取评价指标样本集的分类信息来确定各评价指标的分类权重,用基于 AGA 的 AHP 法提取评价指标样本集的排序信息来确定各评价指标的排序权重,然后用 AGA 进行对这两类权重综合得到组合权重 (Combined Weights, CW),从而建立一种新的系统评价模型 (CWSE)。本文正是采用 CWSE 模型对各特征参数的权重进行了确定 [6]。

### 2.2 CWSE 模型确定权重的步骤

**步骤 1** 建立系统评价指标体系。设有  $n$  个评价指标组成对全体  $m$  个评价对象的评价指标样本集数据为  $\{x(i, j) \mid i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m\}$ , 指标值  $x(i, j)$  为非负值。为消除各评价指标的量纲效应,使模型具有通用性,需对样本数据集  $\{x(i, j)\}$  进行标准化处理:

对越大越优型指标的标准化处理公式取为:

$$r(i, j) = x(i, j) / [x_{\min}(i) + x_{\max}(i)] \quad (14)$$

对越小越优型指标的标准化处理公式取为:

$$r(i, j) = [x_{\min}(i) + x_{\max}(i) - x(i, j)] / [x_{\min}(i) + x_{\max}(i)] \quad (15)$$

对越中越优型指标的标准化处理公式取为:

$$r(i, j) = \begin{cases} r(i, j) = x(i, j) / [x_{mid}(i) + x_{max}(i)] & x_{min}(i) \leq x(i, j) < x_{mid}(i) \\ [x_{mid}(i) + x_{max}(i) - x(i, j)] / [x_{mid}(i) + x_{max}(i)] & x_{mid}(i) \leq x(i, j) < x_{max}(i) \end{cases} \quad (16)$$

式中  $x_{max}(i), x_{mid}(i), x_{min}(i)$  分别为各评价对象中第  $i$  个指标的最小值、最大值和中间最适值;  $r(i, j)$  为标准化后的评价指标值, 也就是第  $j$  个评价对象第  $i$  个评价指标从属于优的相对隶属度值, 以  $r(i, j)$  值为元素可组成单评价指标的模糊评价矩阵  $R = (r(i, j))_{n \times m}$ 。

**步骤 2** 确定各评价指标的分类权重  $\{w(i, 1) \mid i = 1, \dots, n\}$ 。 $n$  维数据  $\{r(i, j) \mid i = 1, \dots, n\}$  以  $a = (a(1), a(2), \dots, a(n))$  为投影方向的一维投影值  $z(j)$  :

$$z(j) = \sum_{i=1}^n a(i)r(i, j), j = 1, \dots, m \quad (17)$$

式中:  $a$  为单位长度向量, 在综合投影值时, 要求投影值  $z(j)$  的散布特征应为: 局部投影点尽可能密集, 最好凝聚成若干个点团; 而在整体上投影点团之间尽可能散开。为此, 投影指标函数可构造为:

$$Q(a) = S_z D_z$$

$$S_z = \left[ \sum_{j=1}^m (z(j) - \bar{z})^2 / (m - 1) \right]^{0.5} \quad (18)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (K - d_{ij}) u(K - d_{ij})$$

式中:  $\bar{z}$  为  $\{z(j) \mid j = 1, \dots, m\}$  均值;  $K$  为局部密度的窗口半径,  $K$  一般取为  $0.1S_z$ ,  $u$  为单位阶跃函数。

令

$$\max Q(a) = S_z D_z$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^n a^2(i) = 1, a(i) \geq 0 \quad (19)$$

式(19)是一个复杂的非线性最优化问题, 一般的方法求解很难求得全局最优解, 可用遗传算法对  $a$  求解。所得  $a$  值为最佳投影方向, 它反映了高维数据分类特征的投影方向: 把最佳投影方向  $a$  各分量的归一化值作为所求的分类权重  $\{w(i, 1) \mid i = 1, \dots, n\}$ 。

**步骤 3** 确定各评价指标的排序权重  $\{w(i, 2) \mid i = 1, \dots, n\}$ 。矩阵  $R = (r(i, j))_{n \times m}$  可构造用于确定各评价指标排序权重的判断矩阵  $B = (b_{ij})_{n \times n}$ 。系统评价的实质是一种优化排序过程, 因此  $Rr(i, j)$  中的元素值  $r(i, j)$  越大可认为对评价对象排序的影响也越大, 从第  $i$  个评价指标的角度看, 也就是  $R$  矩阵第  $i$  行元素的代数和:

$$s(i) = \sum_{j=1}^m r(i, j) \quad (20)$$

越大可认为对优化排序的影响也越大。根据各评价指标的  $s(i)$  值的大小, 按照式(10)可得到判断矩阵  $B = (b_{ij})_{n \times n}$  :

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{s(i) - s(j)}{s_{max} - s_{min}}(b_m - 1) + 1 & s(i) \geq s(j) \\ \frac{1}{\left[ \frac{s(i) - s(j)}{s_{max} - s_{min}}(b_m - 1) + 1 \right]} & s(i) < s(j) \end{cases} \quad (21)$$

判断矩阵  $B = (b_{ij})_{n \times n}$  与排序权重  $\{w(i, 2) \mid i = 1, \dots, n\}$  存在如下关系:

$$b(i, j) = \frac{w(i, 2)}{w(j, 2)} \quad (22)$$

判断矩阵  $B$  需要具有良好的一致性程度, 这主要取决于判断者对系统各要素的把握程度, 对各要素优劣认识得越清楚, 一致性程度就越高,  $B$  的一致性程度可以通过萨迪提出一致性指标 C. I. (Consistency index) 和随机一致性指标 R. I. (Random index) 的概念获得:

$$C. I = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (23)$$

$\lambda_{max}$  为除最大特征根外的  $n - 1$  个特征根的平均值。表 2 列出了 10 阶以内的随机一致性指标:

表 2 10 阶以内的随机一致性指标

Table 2 Random Consistency index within 10 exponent

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R. I	0	0	0.58	0.90	1.21	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

则一致性比例 C. R (Consistency ration):

$$C. R = \frac{C. I}{R. I} \quad (24)$$

萨迪认为 C. R. < 0.1 时, 矩阵的一致性是可以接受的, C. R. > 0.1 时, 一致性是不能接受的, 必须对判断矩阵进行修正, 具体修正方法见文献[6]。

**步骤 4** 确定各评价指标的组合权重  $\{w(i) \mid i = 1, \dots, n\}$ 。为综合利用评价指标的分类权重和排序权重, 应使对所有评价对象的所有指标而言, 在组合权重下评价结果与在分类权重和排序权重下的评价结果的离差越小越好, 因此可通过求解如下加权离差绝对值和最小化问题来估计最佳组合权重:

$$\min F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [\delta | w(i, 1) - w(i) | r(i, j) + (1 - \delta) | w(i, 2) - w(i) | r(i, j)] \quad (25)$$

其中,  $\delta \in [0, 1]$  为分类权重的权重, 使  $F$  最小的  $w(i)$  即为所求组合权重。

**步骤 5** 把各评价指标的组合权重  $w(i)$  与各评价对象相应评价指标的相对隶属度值  $r(i, j)$  相乘并累加, 可得评价对象的综合指标值  $I(j)$ :

$$I(j) = \sum_{i=1}^n w(i) r(i, j) \quad (26)$$

$I(j)$  越大, 说明第  $j$  个评价对象越优, 据此可对各评价对象进行分类排序<sup>[6]</sup>。

### 3 应用实例及数据分析

限于篇幅, 这里没有全部使用 84 块区域, 仅随机挑选了其中的 27 块区域进行了组合权重确定试验, 目的在于验证本文提出方法的有效性。

#### 3.1 组合权重确定

利用式(14)、(15)、(16) 计算标准差、分形维数、累加梯度、绝对值粗糙度的相对隶属度  $\{R(i, j) \mid i = 1, \dots, 4, j = 1, \dots, 27\}$ 。把  $\{R(i, j) \mid i = 1, \dots, 4, j = 1, \dots, 27\}$  依次代入步骤 2 中的式(17)、(18) 得此例的投影指标函数, 然后求由式(19) 所确定的问题, 得最佳投影方向  $a = (0.8014, 0.2013, 0.2928, 0.4812)$ , 并把  $a$  各分量的归一化得分分类权重  $w(i, 1) = (0.4511, 0.1133, 0.1648, 0.2708)$ 。

由  $\{R(i, j) \mid i = 1, \dots, 4, j = 1, \dots, 27\}$  得到评价的  $s(i)$  值的分别为 5.8638、6.0226、5.1216、5.1894, 相对重要性程度值  $b_m = 9$ , 由式(21) 即得用于确定排序权重的判断矩阵  $B$ , 根据式(23)、(24) 及表 2 求得一致性比例 C. R = 0.030342, C. R < 0.1 不需要修正, 按式(21) 规一化求得排序权重  $w(i, 2) = (0.7331, 0.0946, 0.0909, 0.0815)$ 。

将  $w(i, 1), w(i, 2)$  代入式(25), 分类系数  $\delta = 0.5$ , 求  $F$  最小值, 确定组合权重  $w(i)$ ,  $w(i) = (0.3675, 0.5005, 0.0627, 0.0693)$ , 利用求得组合权重  $w(i)$  对 13 块区域进行分类排序得到综合指标, 结果见表 3, 综合指标与匹配概率关系示意图如图 2 所示。

#### 3.2 数据分析

从表 3 数据可以得出以下几点结论:

(1) 综合指标综合了 4 种特征参数——标准差、分形维数、累加梯度、绝对值粗糙度的排序和分类信息, 其中对综合指标影响最显著的是分形维数, 权系数为 0.5005, 标准差次之, 权系数为 0.3675, 累加梯度和绝对值粗糙度贡献较小, 分别为 0.0627 和 0.0693, 说明 4 种特征参数包含排序和分类信息量由大至小分别为: 分形维数、标准差、累加梯度、绝对值粗糙度;

(2) 取匹配概率阈值为 0.7, 综合指标阈值为 0.410, 分别计算了落于  $\{(P_i \geq 0.7) \cap (C_i \geq 0.41)\}$  区域和  $\{(P_i < 0.7) \cap (C_i < 0.41)\}$  区域的点数, 分别为 19 和 4, 根据式(12)——可信度定义计算了基于综合指标对适配性评价的可信度  $B_f = 0.851$ , 这比以标准差为特征参数的适配性可信度提高了 0.344, 比分形维数提高了 0.3629, 比累加梯度和绝对值粗糙度提高了 0.3153, 可以说与基于单一特征参数的适配性评价相比, 可信度有了明显改善(示意图见图 2);

(3) 本次试验中仍有 4 块区域出现误判现象, 为区域 10、区域 11、区域 12、区域 23, 分析出现误判点的原因主要是由于是评价指标体系包含的特征参数数量有限, 即它们包含的信息量还不够大, 可以适当增加参加排序特征参数数量以增加评价指标体系包含的信息量。

表 3 特征参数与基于组合权重的综合指标数据对比  
Table 3 Contrast of characteristic parameter and aggregative indicator based on AHP

区域	参数						综合指标及其排序	
	标准差	分形维数	累加梯度	绝对值粗糙度	匹配概率及其排序			
1	45.5719	2.0738	109.85	5.1178	0.865	8	0.516	6
2	45.5719	2.3727	185.4	8.6566	1	1	0.590	2
3	45.6826	2.1104	79.85	3.6422	0.895	5	0.504	7
4	45.5587	2.0698	144.98	7.1158	0.894	6	0.536	5
5	25.2679	2.0497	93.791	4.1355	0.501	24	0.404	24
6	25.2335	2.0693	71.629	3.2325	0.28	27	0.395	26
7	25.3525	2.0511	94.193	4.1192	0.622	23	0.405	22
8	25.2467	2.3656	99.472	4.2132	0.782	14	0.442	13
9	19.0165	2.2098	146.58	6.4368	0.656	22	0.419	20
10	18.7352	2.0695	144.5	7.0211	0.391	26	0.405	23
11	19.2852	2.0631	123.08	5.4038	0.705	21	0.392	27
12	18.7411	2.3291	81.811	3.6767	0.727	19	0.398	25
13	23.7398	2.0686	138.12	6.784	0.731	17	0.426	19
14	23.7571	2.3106	135.42	6.7455	0.828	10	0.453	11
15	23.8384	2.1292	158.71	7.2406	0.806	12	0.442	14
16	23.9144	2.1637	93.734	4.1332	0.729	18	0.411	21
17	33.1752	2.065	154.67	6.9668	0.717	20	0.477	9
18	32.5975	2.1581	43.269	2.0953	0.77	16	0.427	18
19	32.9711	2.0805	205.52	9.1299	0.877	7	0.504	8
20	33.0212	2.0887	103.47	4.9194	0.855	9	0.454	10
21	31.9984	2.1248	92.853	4.1073	0.777	15	0.445	12
22	31.9984	2.0335	87.782	3.7457	0.795	13	0.431	17
23	32.0015	2.0654	95.908	4.5669	0.471	25	0.442	15
24	31.9906	2.0644	97.99	4.5855	0.813	11	0.442	16
25	56.8110	2.0524	139.56	5.8356	0.946	2	0.580	3
26	56.9684	2.0979	196.41	8.3976	0.911	3	0.616	1
27	56.7238	2.2009	91.305	4.0657	0.896	4	0.573	4

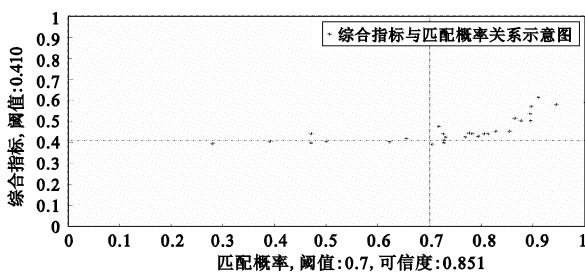


图 2 综合指标与匹配概率对应关系曲线  
Fig.2 Graph of relation between aggregative indicator and matching probability

#### 4 结论

本文从分析单一地磁场特征参数与匹配概率之间关系入手,发现基于单一地磁场特征参数的适配性评价可信度较低,不能作为适配性评价的有效根据,进而提出一种基于层次分析法的适配性评价方

法,综合多种特征参数的排序和分类信息,提高数据分析发现,基于层次分析法的适配性评价的可信度达到  $B_f = 0.851$ , 这比以标准差为特征参数的适配性可信度提高了 0.344, 比分形维数提高了 0.3629, 比累加梯度和绝对值粗糙度提高了 0.3153, 从而得出结论:基于层次分析的适配性评价能够有效评价匹配区的适配性,较之基于单一地磁场特征参数的适配性评价效果改善明显。

#### 参考文献:

[1] 曹菲. 景象匹配制导基准图生成与评估技术研究[D]. 西安: 第二炮兵工程学院博士学位论文, 2006. [CAO Fei. Research on guidance scene matching reference map preparation and evaluation[D]. The Second Artillery Engineering College Doctor paper, 2006 (in Chinese). ]  
[2] 袁梦尤. 景象匹配区选择方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学硕士论文, 2002. [YUAN Meng-you. Scene matching area selection method research[D]. Changsha: National University of Defense Technology Master's thesis, 2002.]

- tion algorithms [D]. National University of Defense Technology Master Paper, 2002. ]
- [3] 程力, 张雅杰, 蔡体菁. 重力辅助导航匹配区域选择 [J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15 (5): 559-563. [ CHENG Li, ZHANG Ya-jie, CAI Ti-jing. Selection criterion for matching area in gravity aided navigation [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(5): 559-563 (in chinese). ]
- [4] 李俊, 杨新, 朱菊华, 等. 用于精确定位的最佳匹配区选择分形法 [J]. 上海交通大学学报, 2001, 35 (2): 305-308. [ LI Jun, YANG Xin, ZHU Ju-hua, et al. Selection of suitable matching area by fractal based approach for high precision location [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001, 35 (2): 305-308 (in chinese). ]
- [5] 金菊良, 魏一鸣, 丁晶. 基于组合权重的系统评价模型 [J]. 数学的实践与认识, 2003, 33 (11): 51 - 59. [ VJIN Ju-liang, WEI Yi-ming, DING Jing. System evaluation model based on combined weights [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2003, 33(11): 51 - 59 (in chinese). ]
- [6] 刘扬, 姚妮媚, 金善良. 景象匹配正确定位概率的实验研究 [J]. 宇航学报, 2001, 22(6): 91 - 94. [ LIU Yang, YAO Ya-mei, JIN Shan-liang. A experimental study of the scene matching probability [J]. Journal of Astronautics, 2001, 22 (6): 91 - 94 (in chinese). ]
- [7] JIANG Li. Information mining in remote sensing imagery [D]. The Graduate College at the University of Nebraska in Partial Fulfillment of Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, 2003.
- [8] 付强, 赵小勇. 投影寻踪模型原理及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006. [ FU Qiang, ZHAO Xiao-yong. Projector seeking trace model theory and application [M]. Beijing: Scientific Press, 2006.
- 作者简介: 王哲 (1981 - ), 男, 硕士生, 研究方向为导航、制导与控制。  
通信地址: 山东省烟台市海军航空工程学院战略导弹工程系 (264000)  
电话: 13697861763  
E-mail: wang123451234512@sina.com.cn

## A Matching Suitability Evaluation Method Based on Analytic Hierarchy Process in Geomagnetism Matching Guidance

WANG Zhe<sup>1</sup>, WANG Shi-cheng<sup>2</sup>, ZHANG Jin-sheng<sup>2</sup>, QIAO Yu-kun<sup>2</sup>, CHEN Li-hua<sup>2</sup>

(1. Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264000, China;

2. Guidance and Simulation Center of the Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** A suitability evaluation method based on analytic hierarchy process (AHP) was introduced against the misjudgment likely to be made when evaluate matching area suitability using single geomagnetic characteristic parameter. The concept of reliability was defined through an analysis of a great deal of test data. The analysis of reliability between 4 geomagnetic characteristic parameter and matching probability indicated that single parameter can't effectively evaluate the suitability. In order to evaluate matching suitability effectively, a evaluation method of matching suitability based on analytic hierarchy process (AHP) was introduced through information analysis implied in geomagnetic field characteristic parameters. The new method attained an effective evaluation by using multi-parameter information. Suitability evaluation tests were done using the new method. The test data indicates that the effect of the evaluation attained by new method be greatly improved and consistent with the matching simulation tests.

**Key words:** Geomagnetism matching guidance; Matching suitability evaluation; Analytic hierarchy process; Reliability