

基于投影寻踪的地磁匹配区选取方法

刘玉霞, 周 军, 葛致磊

(西北工业大学 精确制导与控制研究所, 西安 710072)

摘 要: 针对基于单一地磁特征参数进行区域选取容易出现评价结果不全面的缺陷, 提出了多特征参数融合的地磁匹配区选取方法。该方法结合信息熵和投影寻踪理论, 综合考虑地磁标准差、粗糙度、相关系数和地磁熵等反映特定区域内地磁的总体起伏、光滑度、相关性强弱和信息量多少的地磁特征参数对匹配区的影响, 建立了基于投影寻踪的地磁匹配区选取模型, 利用遗传算法求解出最优投影方向, 给出区域总的评价指数。利用文中提出的方法在选定区域进行了仿真试验, 仿真结果表明, 针对 ICCP 算法, 在总评价指标高的区域进行地磁辅助导航, 其匹配误差较小。

关键词: 地磁辅助导航; 匹配区域; 导航信息量; 投影寻踪

中图分类号: V249.32 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2010)12-2677-06

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2010.12.009

A Projecting Pursuit-Based Selection Method for Matching Region in Geomagnetism Navigation

LIU Yu-xia, ZHOU Jun, GE Zhi-lei

(Institute of Precision Guidance and Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A multi-characteristic parameters fusion selection method combining information entropy with project pursuit theory is presented in view of the disadvantage of one-sided appraisal for the selection method based on single geomagnetic characteristic parameter. The effects of geomagnetic characteristic parameters such as standard deviation, roughness, correlation and entropy which reflect respectively the geomagnetism global wave, smoothness, degree of correlation and amount of information on matching region selection are considered comprehensively. A geomagnetic matching selection model based on projecting pursuit is established, the best projection direction is solved by using a genetic algorithm, and then a total evaluation indicator is given. Simulation tests are done by using the proposed method in selected areas; Simulation results indicate that the matching error is smaller for geomagnetism aided navigation in the area of high evaluation indicator.

Key words: Geomagnetism aided navigation; Matching region; Navigation information; Projecting pursuit

0 引 言

地磁导航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, 达到导航的目的。

地磁导航因具有无源、全自主、无辐射、体积小、能耗低、价格便宜等优良特性, 已成为导航重要发展方向, 日益受到关注^[1-2]。地磁辅助导航系统的导航定位精度不仅与地磁匹配算法有关, 而且与地磁匹配区域选择有关^[3-5]。地磁导航作为巡航导弹等

武器系统的一种重要的辅助导航方式,为了获得比较高的定位精度,往往需要对飞行航迹进行规划,以确保匹配的精度和可靠性^[3-5]。因此研究地磁匹配系统的适配性,掌握选择地磁匹配区的方法,具有重要的实际意义。

文献[3]将相关长度、地形熵、粗糙度作为反映基准子图适配性的特征向量,采用最小二乘支持向量机作为分类工具,将基准图划分为适配区和非适配区两类,最后将适配区作为地形匹配区;文献[4]基于大量仿真实验,提出基于信噪比、粗糙方差比选择地磁匹配区,对匹配区的选择进行了有益的探讨。本文从统计学角度出发,首先分析了影响地磁匹配性能的主要特征参数,包括标准差、粗糙度、相关系数、地磁熵等;然后,从这些特征参数对匹配区的影响着手,提出了多特征参数融合的地磁匹配区选取方法,该方法综合信息熵和投影寻踪理论,建立了基于投影寻踪的地磁匹配区选取模型,利用遗传算法求解出最优投影方向,给出区域总的评价指数;最后,按照文中提出的方法,在5块不同的区域中,进行了仿真试验。仿真结果表明,针对 ICCP 算法,在总评价指标高的区域进行地磁辅助导航,其匹配误差将更小,进而验证了该方法的有效性。

1 地磁场特征信息量

地磁数据一般采用网格矩阵的方式存储。设某地磁区域的经纬度跨度为 $m \times n$ 网格, $F(i, j)$ 为网格点坐标为 (i, j) 处的地磁场总强度。地磁特征参数包括地磁强度标准差、地磁粗糙度、相关系数、地磁熵等,其具体定义如下。

1.1 地磁强度标准差

地磁强度标准差被用来描述地磁的粗糙特性(或不平度),因为样本的标准差反映了一个样本集合总体上偏离其平均水平的程度。地磁强度标准差的计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m \times (n-1)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (F(i, j) - \bar{F})^2} \quad (1)$$

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

其中: σ 为地磁强度标准差, \bar{F} 为地磁强度均值。

1.2 地磁粗糙度

地磁粗糙度定义为:

$$Q = \frac{(Q_\lambda + Q_\varphi)}{2} \quad (3)$$

其中, Q_λ 、 Q_φ 分别为经度和纬度方向的粗糙度,

$$Q_\lambda^2 = \frac{1}{(m-1) \times n} \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^n |F(i, j) - F(i+1, j)| \quad (4)$$

$$Q_\varphi^2 = \frac{1}{m \times (n-1)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n-1} |F(i, j) - F(i, j+1)| \quad (5)$$

粗糙度 Q 反映了地磁场的光滑程度,是刻画地磁场局部起伏大小的特征参数。

1.3 地磁相关系数

相关系数定义为:

$$R = \frac{(R_\lambda + R_\varphi)}{2} \quad (6)$$

其中, R_λ 、 R_φ 分别为经度和纬度方向的相关系数,

$$R_\lambda = \frac{1}{(m-1)n\sigma^2} \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^n |F(i, j) - \bar{F}| \cdot |F(i+1, j) - \bar{F}| \quad (7)$$

$$R_\varphi = \frac{1}{m(n-1)\sigma^2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n-1} |F(i, j) - \bar{F}| \cdot |F(i, j+1) - \bar{F}| \quad (8)$$

相关系数 R 刻画了区域地磁场的相关程度,相关系数越小,区域地磁场的相关程度越小,地磁场特征越明显,越容易实现准确匹配。

1.4 地磁熵

地磁熵定义为:

$$H_f = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ij} \lg p_{ij} \quad (9)$$

$$p_{ij} = \frac{F(i, j)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n F(i, j)} \quad (10)$$

其中: p_{ij} 为地磁点坐标处的归一化地磁场强度, H_f 为地磁熵。

地磁熵反映了该地磁场含有信息量的大小,因此可以用来描述地磁场的性质。地磁强度变化越剧烈,信息量越丰富,地磁熵越小。同时由于其对噪声不敏感,可起到剔除离散点的作用。

2 基于投影寻踪理论选取地磁匹配区

标准差、粗糙度、相关系数和地磁熵是从不同侧面反映地磁场的特征参数。大量的仿真试验表明,

在实验条件一定情况下,地磁匹配概率随相关系数、地磁熵的减小而增大,随标准差、粗糙度的增大而增大。但每个单独的参数和匹配概率之间均无法获得一一对应的关系。为此,采取多特征融合的方法将地磁参数融合起来构成一个特征向量 $X = [\sigma, Q, R, H_f]$, 并依据该特征向量判断该区域是否能够正确匹配,以寻求一种更为可靠的地磁匹配区选取方法。

2.1 投影寻踪的基本思想^[8]

投影寻踪是处理多因素复杂问题的统计方法,其基本思想是利用计算机技术,把高维数据通过某种组合投影到低维(1~3 维)子空间上,并通过极大化某个投影指标,寻找出能反映原高维数据结构或特征的投影,在低维空间上对数据结构进行分析,以达到研究和分析高维数据的目的。

2.2 基于投影寻踪的地磁多特征参数融合

利用投影寻踪技术对地磁匹配区域进行选取、评判,就是研究“评价指标(地磁特征参数)”与“待评集(选取区域)”之间的关系^[6-7]。基于投影寻踪的地磁多特征参数融合模型建立过程如下:

(1) 地磁特征参数归一化

在建模之前对数据进行归一化处理,针对不同数据类型采用不同的公式进行归一化。

对于参数值越大,匹配率越高的特征参数

$$x'(i, j) = \frac{x(i, j)}{x_{\max}(j)} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p) \quad (11)$$

对于参数值越小,匹配率越高的特征参数

$$x'(i, j) = \frac{x_{\min}(j)}{x(i, j)} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p) \quad (12)$$

式中: $x(i, j)$ 为第 i 个待评集中第 j 个地磁特征参数, n, p 分别为待评集的个数和特征参数的数目, $x'(i, j)$ 为地磁特征参数归一化序列, $x_{\max}(j)$ 为待评集中第 j 个地磁特征参数的最大值, $x_{\min}(j)$ 为待评集中第 j 个地磁特征参数的最小值。

(2) 构造投影指标函数 $Q(w)$

投影寻踪方法就是把 p 维数据 $x'(i, j)$ 综合成以单位向量 $w = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_p]$ 为投影方向的一维投影值 $z(i)$, 即

$$z(i) = \sum_{j=1}^p w_j x'(i, j), (i = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

然后根据 $z(i)$ 的一维散布图进行分类。综合投影指标值时,要求投影值 $z(i)$ 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。因此,投影指标函数可以表达成

$$Q(w) = S_z D_z \quad (14)$$

式中: S_z 为投影值 $z(i)$ 的标准差; D_z 为投影值 $z(i)$ 的局部密度:

$$S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z(i) - E(z))^2}{n - 1}} \quad (15)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r(i, j)) u(R - r(i, j)) \quad (16)$$

式中: $E(z)$ 为序列 $\{z(i), i = 1, 2, \dots, n\}$ 的均值; R 为局部密度的窗口半径,它的选取既要使包含在窗口内的投影点的平均个数不太少,避免滑动偏差值太大,又不能使它随着 n 的增大而增加太高。文中 $R = 0.1 S_z$, 采用的就是 Friedman 等建议的密度窗宽取全部样本投影方差的 10%; $r(i, j) = z(i) - z(j)$, 表示样本之间的距离; $u(t)$ 为单位阶跃函数,当 $t \geq 0$ 时,其值为 1,当 $t < 0$ 时其值为 0。

(3) 优化投影指标函数 $Q(w)$

当待评集的地磁特征参数给定时,投影指标函数 $Q(w)$ 只随着投影方向 w 变化,不同的投影方向反映不同的数据结构特征,最佳投影方向就是最有效地反映原高维数据某类结构特征的投影方向,因此,可通过求解投影指标函数最大化问题来估计最佳投影方向,即

最大化目标函数:

$$\max: Q(w) = S_z D_z \quad (17)$$

约束条件:

$$\sum_{j=1}^p w_j^2 = 1, w_j \in [0, 1]$$

(4) 计算投影值

把由步骤(3)求得的最佳投影方向 w^* 代入式(13),可得各个待评集的投影值 $z^*(i)$ 。若将 $z^*(i)$ 从大到小排序,就可以将待评集根据信息量从多到少进行排序。

2.3 投影方向的优化选择

通过求解上述步骤建立的投影寻踪模型,可以得到最佳投影方向,进而计算出投影值。根据式(17)可知,该问题为有约束条件下的多维非线性优

化问题,很多传统的方法都难以解决,采用遗传算法能够较好地解决这类问题,因为该算法基本上不需要问题的领域知识,并且对函数的类型和搜索空间的形状没有任何限制。

由于该问题为有约束条件下的多维非线性优化问题,因此利用罚函数法,将式(17)描述的问题转化为如下增广目标函数的最小值问题:

$$\begin{cases} -\min Q(\mu, \mathbf{w}) = -S_z D_z + \mu \cdot P(\mathbf{w}) \\ P(\mathbf{w}) = \sum_{i=1}^p w_i^2 - 1 \end{cases} \quad (18)$$

其中: μ 为惩罚因子, $P(\mathbf{w})$ 为惩罚函数, $\mu \cdot P(\mathbf{w})$ 称为惩罚项。在 $P(\mathbf{w})$ 中,对于不满足约束条件的向量 $\mathbf{w} = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_p]$,惩罚项 $\mu \cdot P(\mathbf{w}) > 0$,这是一种对不满足约束条件的惩罚。当满足约束条件时,则有惩罚项 $\mu \cdot P(\mathbf{w}) = 0$,表明不受惩罚。

3 仿真结果及分析

为了便于对比和分析,用模拟计算得到的地磁总强度作为试验数据为例来确定地磁匹配区域选取方法。图1为生成的地磁总强度二维等值线图。其选取步骤如下。

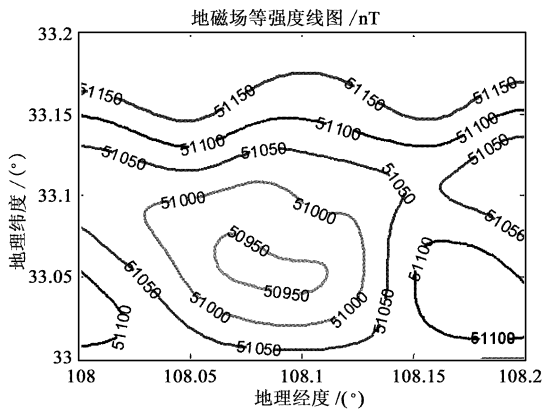


图1 地磁总强度二维等值线图

Fig.1 Two-dimensional geomagnetic contour map

(1) 在图1中选取5块区域(10×10网格)作为待评集,按照文中第1节给出的地磁特征参数计算方法,确定4个评价指标(地磁特征参数)。其中区域1为经度108.03°~108.05°,纬度33.04°~33.06°的区域,2为经度108.07°~108.09°,纬度33.08°~33.10°的区域,3为经度108.11°~108.13°,纬度33.12°~33.14°的区域,4为经度108.15°~108.17°,纬度33.14°~33.16°的区域,5为经度108.17°~108.19°,

纬度33.16°~33.18°的区域。5个区域的4个评价指标如表1所示。从表1可以看出,各个区域地磁特征参数的规律均不相同,因此单个特征参数不足以确定地磁可导航性能。

表1 5个区域地磁导航信息量比较

Table 1 The comparison of navigation information in five areas

区域	标准差	粗糙度	相关系数	地磁熵
1	20.6994	2.2159	0.8039	1.6054
2	8.8343	1.4628	0.8007	1.3561
3	14.4952	1.7627	0.8044	1.8933
4	15.6486	1.9160	0.7995	1.8536
5	9.1445	1.4461	0.7981	1.4090

(2) 按照文中2.3节的方法,确定最佳投影方向 $\mathbf{w}^* = [0.6141 \ 0.4607 \ 0.5302 \ 0.3607]$ 。

(3) 根据式(13),得到5个区域的综合评价值 $\mathbf{z} = [1.9064 \ 1.4321 \ 1.5674 \ 1.6465 \ 1.4252]$ 从结果看,5块区域地磁的可导航性能的排列顺序为 $1 > 4 > 3 > 2 > 5$ 。

在上述地磁区进行仿真模拟。模拟中共记录5个地磁总强度值作为测量数据。匹配算法采用IC-CP算法,分别对5块区域进行匹配仿真。试验中,为考察5块区域内整体匹配情况,以不同的方式进行了仿真实验。试验1:将真实轨迹绕原点旋转1°,在经度、纬度方向各平移1个网格。试验2:将真实轨迹绕原点旋转2°,在经度、纬度方向分别平移5个、1个网格。试验3:将真实轨迹绕原点旋转10°,在经度、纬度方向分别平移5个、1个网格。匹配结果由表2和图2给出,其中,表2中定位误差的单位为网格数。这里只给出试验2中,5块区域下ICCP算法的仿真曲线图,如图2。其中,星型线为惯导指示的轨迹,圆圈型线为真实的轨迹,加号型线为IC-CP校正的轨迹。

表2 5个区域地磁匹配结果

Table 1 The matching results in five areas

试验区域	试验1		试验2		试验3	
	定位误差	匹配率	定位误差	匹配率	定位误差	匹配率
1	0.357	100%	0.372	100%	1.388	80%
2	1.164	100%	1.394	80%	1.758	20%
3	1.039	100%	1.059	100%	1.574	40%
4	0.366	100%	0.372	100%	1.414	60%
5	1.359	80%	1.405	60%	2.221	0

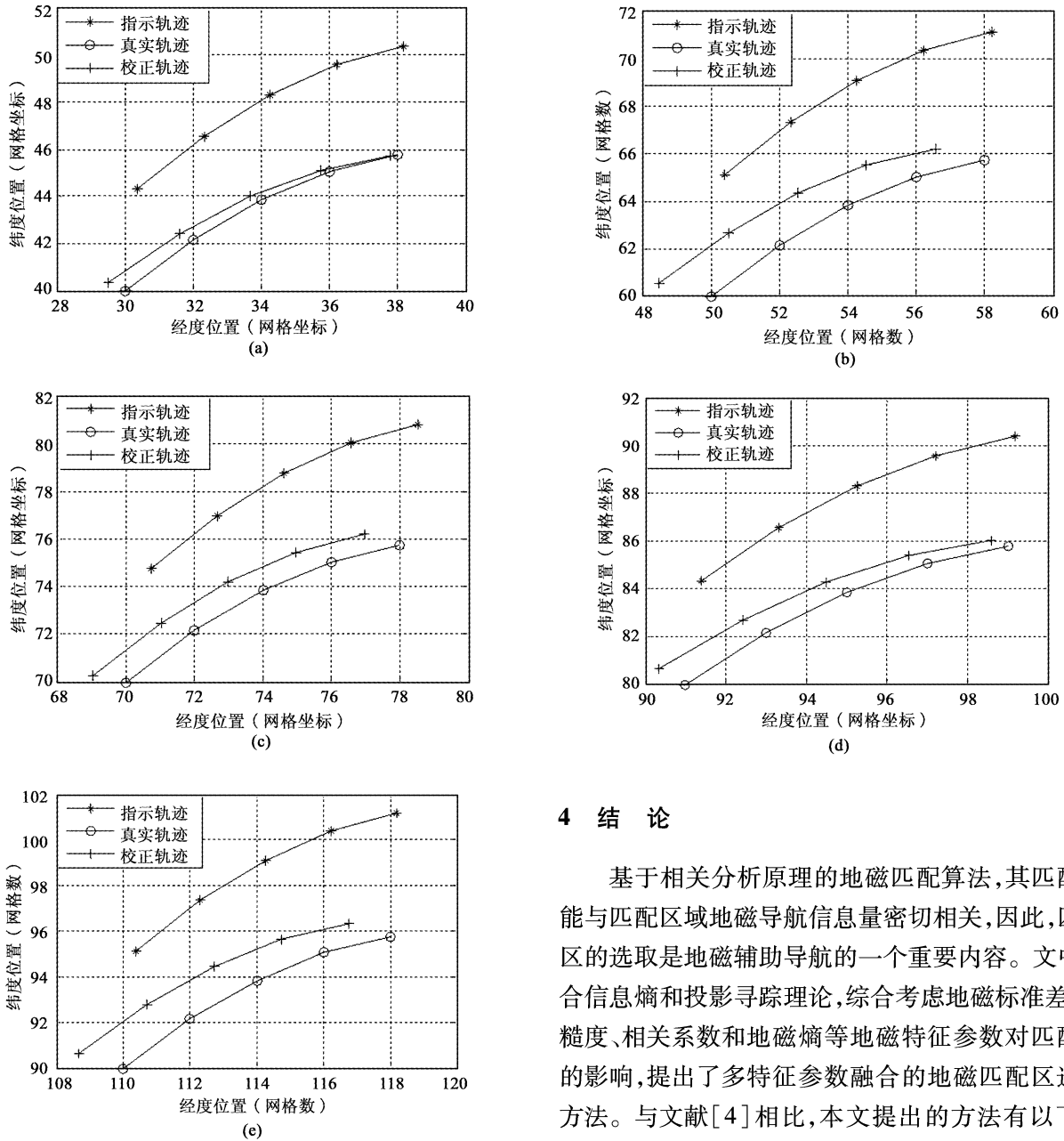


图 2 五个不同区域下的仿真结果

Fig. 2 Five different areas simulation results

由图 2 可以看出,地磁特征参数不同,仿真结果差别较大,说明地磁区域的选取对 ICCP 算法有一定的影响。由表 2 可知,ICCP 算法进行匹配在初始位置比较精确的情况下会取得较好的结果,但是初始位置不准确时,误差较大。由表 2 可知,不论在何种试验条件下,综合评价价值越大(即地磁信息越丰富)的地磁区域,使用 ICCP 算法越易取得较好的匹配效果。

4 结 论

基于相关分析原理的地磁匹配算法,其匹配性能与匹配区域地磁导航信息量密切相关,因此,匹配区的选取是地磁辅助导航的一个重要内容。文中结合信息熵和投影寻踪理论,综合考虑地磁标准差、粗糙度、相关系数和地磁熵等地磁特征参数对匹配区的影响,提出了多特征参数融合的地磁匹配区选取方法。与文献[4]相比,本文提出的方法有以下两方面的改进之处:(1) 克服了文献[4]单独考虑地磁特征参数对区域选取不全面的缺陷;(2) 本文提出的方法在理论上更具有可信度。因此可以作为匹配区选取、地磁适配性分析以及航线规划的数量性依据。仿真结果证明了该方法的可行性。

参 考 文 献

[1] Iwaki F, Kakihara M, Sasaki M. Recognition of vehicle's location for navigation[C]. The Vehicle Navigation and Information Systems Conference, Toronto, Ontario, Canada, September 11 - 13, 1989.

[2] Hamada T, Shigetomi T, Orimo Y, et al. Study on underwater

- navigation system for long - range autonomous underwater vehicles using geomagnetic and bathymetric information[C]. The 27th International Offshore and Polar Engineering Conference, Lisbon, Portugal, July 1 - 6, 2007.
- [3] 程华, 马杰, 龚俊斌, 等. 基于最小二乘支持向量机的三维地形匹配选择[J]. 华中科技大学学报, 自然科学版, 2008, 36(1): 34 - 37. [Cheng Hua, Ma Jie, Gong Jun-bin, et al. Selection of suitable 3D terrain matching field based on least squares support vector machines[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2008, 36(1): 34 - 37.]
- [4] 周贤高, 李士心, 杨建林, 等. 地磁匹配导航中的特征区域选取[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(6): 695 - 698. [Zhou Xian-gao, Li Shi-xin, Yang Jian-lin, et al. Selective criteria of characteristic area on geomagnetic map[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2008, 16(6): 695 - 698.]
- [5] 程华, 田金文, 马杰, 等. 基于双近邻模式和最近距离的三维地形匹配区选择[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 631 - 636. [Cheng Hua, Tian Jin-wen, Ma Jie, et al. Selection of suitable 3D terrain matching filed based on dual-neighbor pattern and proximate distance[J]. Journal of Astronautic, 2008, 29(2): 631 - 636.]
- [6] 黄晓荣, 付强, 梁川. 投影寻踪分类模型在工程评价中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(1): 69 - 72. [Huang Xiao-rong, Fu Qiang, Liang Chuan. Application on PPC model based on RAGA in appraisal bid of engineering project[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(1): 69 - 72.]
- [7] 吴建伟, 吴先敏. 基于投影寻踪的模糊模式识别模型在水质评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(3): 93 - 97. [Wu Jian-wei, Wu Xian-min. Application to water quality assessment based on the fuzzy pattern recognition model by project pursuit[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2008, 19(3): 93 - 97.]
- [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: 2 - 3.

作者简介: 刘玉霞(1981 -), 女, 博士生, 研究方向为导航、制导与控制。

通信地址: 西安市友谊西路 127 号 250 信箱(710072)

电话: 15339232868

E-mail: liuyuxia100@sina.com

(编辑: 曹亚君)