

## 基于粒子群优化的飞行器地形匹配新算法

何艳萍, 刘新学, 蔡艳平, 李亚雄, 朱 昱

(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

**摘要:** 为了提高传统地形匹配算法的定位精度问题, 提出了一种基于粒子群优化的飞行器地形匹配新算法。该算法以参考导航系统测量位置为中心规划真实位置的搜索范围, 从基准地形图上提取相应的地形高程数据, 然后将粒子群优化算法引入匹配区搜索, 并将得到的地形剖面像元高程参量作为粒子群体中的粒子。在此基础上, 采用归一化积相关函数作为粒子适应度函数, 通过适应度最大度量值来比较基准子图和实时图剖面的相似程度, 最后通过仿真分析, 比较了基于 TERCOM 和 PSO 的匹配算法匹配精度和匹配时间。仿真结果表明, 基于 PSO 算法的匹配效果优于传统 TERCOM 算法, 匹配时间虽较 TERCOM 算法略长, 但满足实时性要求。

**关键词:** 飞行器; 地形匹配; 地形剖面; 粒子群优化; TERCOM 算法

**中图分类号:** V444; TP339 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S114002

## New aircraft terrain matching algorithm based on particle swarm optimization

He Yanping, Liu Xinxue, Cai Yanping, Li Yaxiong, Zhu Yu

(Rockets Army Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** In order to improve the positioning accuracy of traditional terrain matching algorithm, a new aircraft terrain matching algorithm based on particle swarm optimization was put forward. The search scope of true location was programmed by taking the measured position of referenced navigation system as the center, terrain elevation data was extracted from the referenced topographic map, then the particle swarm optimization algorithm was introduced into the matching area for searching, and the parameter of pixel height of the terrain profile was used as the particle in particle swarm. On this basis of above, correlation function of normalized product was applied as fitness function of particle, then the degree of similarity of the referenced map with profile of real-time image was compared by maximum fitness value, finally through the simulation analysis, comparison of matching accuracy and time based on TERCOM algorithm and PSO algorithm was presented. Simulation results show that the effect of matching based on PSO algorithm is better than traditional TERCOM algorithm, and matching time is slightly longer than TERCOM, but meet the real-time requirement.

**Key words:** aircraft; terrain matching; terrain profile; particle swarm optimization; TERCOM algorithm

收稿日期: 2016-01-10; 修订日期: 2016-02-08

作者简介: 何艳萍(1979-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为飞行器设计。Email: caiyanping502@163.com

## 0 引言

地形辅助导航 (Terrain-Aided Navigation, TAN) 技术是近年来受到广泛重视并已成功使用的辅助导航系统。基于地形高度匹配 (Terrain Elevation Matching, TEM) 的 TAN 技术是一种自主、隐蔽、全天候、导航定位精度与航程无关的低空导航技术<sup>[1-2]</sup>, 对于 TAN 系统的研制, 英美两国起步较早, 并陆续付诸实施, 取得了巨大的军事和经济效益。目前, 国内外对地形匹配辅助导航技术开展了大量的研究<sup>[3-7]</sup>, 其中参考文献[1]研究了适用航空的导航匹配算法; 参考文献 [2-6] 研究了 TERCOM 地形高程辅助导航系统及其相关改进算法, 实现了水下地形匹配、地磁匹配导航等仿真应用; 参考文献[7]采用了 TERCOM 算法和 SITAN 算法相结合的地形匹配组合导航算法, 以满足无人机机动飞行情况下连续匹配的要求。上述研究均在不同程度上提高了 TERCOM 算法地形匹配精度。

近年来, 随着智能计算的发展, 许多跟优化有关的工程问题得到了解决, 由于地形匹配辅助导航系统的匹配问题本质上也属于优化问题, 即比较基准图和实时图剖面的相象程度时通常采用最优相关度量, 如参考文献[8]将粒子群优化应用在海洋实测地磁场数据的匹配中, 参考文献[9-10]将混沌优化、支持向量机应用在水下地形匹配、地形匹配导航的适配区划分中。鉴于地形匹配辅助导航系统的导航定位精度与匹配算法有关, 为了提高传统地形匹配算法的定位精度问题, 文中提出了一种基于粒子群优化的飞行器地形匹配新算法, 给出了算法流程和仿真, 并通过仿真分析, 比较了基于 TERCOM 和 PSO 的匹配算法匹配精度和匹配时间, 仿真结果表明, 基于 PSO 算法的匹配效果优于传统 TERCOM 算法。

## 1 地形高度匹配系统

地形高度匹配系统如图 1 所示, 主要由惯性导航系统 (Inertial Navigation System, INS)、雷达高度表和气压高度表等传感设备和基准数字地图、地形高度匹配计算机组成。

其中, 惯性导航 INS 的工作原理是利用惯性元件来感测载体的旋转角速度和运动加速度, 经过积分运

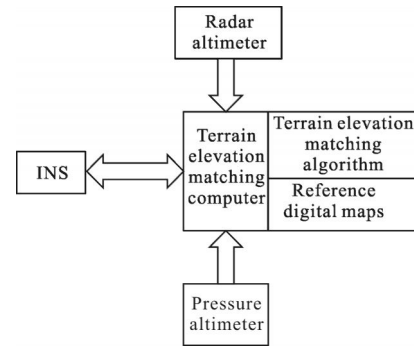


图 1 地形高度匹配系统组成

Fig.1 Composition of terrain height matching system

算, 从而求出导航参数以确定载体位置和姿态。INS 位置误差变化规律用一个非线性函数表示如下:

$$e_{k+1} = f_k(e_k, \omega_k) \quad (1)$$

INS 输出位置信息为:

$$x_k = x_k^* + e_k \quad (2)$$

式中:  $e_k$  表示  $k$  时刻 INS 系统的定位误差;  $f_k(e_k, \omega_k)$  表示  $k$  时刻 INS 误差  $e_k$  的变换规律;  $x_k^*$  表示  $k$  时刻飞行器的实际位置;  $x_k$  表示  $k$  时刻 INS 测量的飞行器的位置坐标;  $\omega_k$  为系统噪声。

气压高度表是利用大气压随高度增加而减小的原理来测量高度的, 其参考面为海平面, 这种高度表的性能直接依赖于大气压力、大气压力梯度以及传感器的设计。一般气压高度表的高度误差方程为:

$$\delta \bar{h}_b = -\frac{v_G}{D} \delta h_b + w_h \quad (3)$$

式中:  $v_G$  表示飞行器地速;  $D$  表示气压相关距离, 一般  $D=463 \text{ km}$ ;  $w_h$  表示测量误差噪声。

雷达高度表利用超高频无线电波从发射天线发射到地面, 再由地面返回接收天线, 测量电波所经历行程的时间, 推算出从发射天线到地面的实际高度, 它与大气条件(气压、温度等)无关。文中综合雷达高度表中的各种误差源, 从工程的角度出发, 把雷达高度表中总的测高误差  $\sigma_{radar}$  统一为:

$$\sigma_{radar} = h_0 \pm d\%H \quad (4)$$

式中:  $H$  为实际离地高度;  $h_0, d$  为雷达高度表性能的参数,  $h_0$  一般取值  $2 \sim 6 \text{ m}$ ,  $d$  一般取值  $0.3 \sim 1.2$ , 具体取值根据仿真的需要和实际情况设定。

## 2 粒子群优化算法

粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization,

PSO)是 Eberhart 和 Kennedy 基于对鸟群、鱼群的模拟提出的一种基于群体的演化算法。假设在一个  $d$  维的目标搜索空间中,有  $m$  个粒子组成一个群体,其中第  $i$  个粒子在搜索空间中的位置是  $X_i$ (即优化问题的解),表示为向量  $X_i=(x_{i1},x_{i2},\dots,x_{id})$ ,其飞行速度记为  $V_i=(v_{i1},v_{i2},\dots,v_{id})$ 。通过评价各粒子的目标函数,确定  $t$  时刻每个粒子所经过的最佳位置  $(pbest)P_i=(p_{i1},p_{i2},\dots,p_{id})$ 和群体所发现的最佳位置  $(pbest)P_g(P_g \in P_i, i \in \{1,2,\dots,m\})$ 。PSO 算法一般根据如下公式对粒子进行操作:

$$\begin{aligned} v_{ij}^{t+1} &= w \times v_{ij}^t + c_1 \times r_1 \times (p_{ij}^t - x_{ij}^t) + c_2 \times r_2 \times (p_{ij}^t - x_{ij}^t) \\ x_{ij}^{t+1} &= x_{ij}^t + K * v_{ij}^{t+1} \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,d; w$  为惯性系数;  $r_1, r_2$  为服从  $U(0,1)$  分布的随机数;  $c_1, c_2$  称为学习因子,为非负常数;  $v_{ij} \in (-v_{max}, v_{max})$ ,  $v_{max}$  为设定非负速度极值;  $K$  是压缩因子,用以对粒子的飞行速度进行约束。粒子群优化算法中粒子位置在每一代的更新方式如图 2 所示。

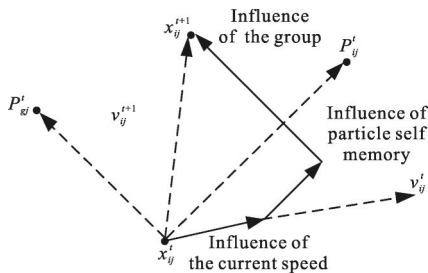


图 2 粒子位置更新示意图

Fig.2 Updated schematic diagram of particle position

### 3 基于粒子群优化的飞行器地形匹配算法

地形高度匹配方法是指利用实时测量的地形高度值序列数据估计载体位置在基准数字地图中位置坐标的方法。飞行器在飞越航线上某些特定的地形区域时,利用雷达高度表和气压高度表等设备测量沿航线的地形标高剖面,将测得的实时图与预存的基准图指示的标高剖面进行相关分析,并按最佳相关确定飞行器的地理位置。

在匹配区上,飞行器保持一定的航线,实时图测量过程中,用导航系统的速度信息控制采用间隔,由采样点的指示位置表示实时图的形状。为方便匹配搜索,如图 3 所示,在地理坐标轴方向上的采样间隔

取基准图像元尺寸,并将采样点位置离散化对应到最邻近的格网。

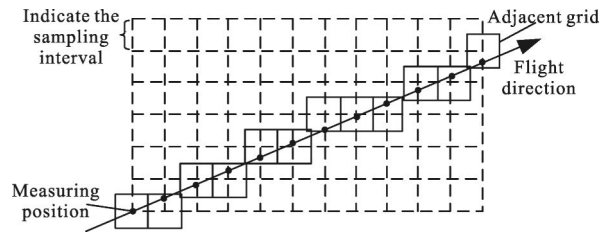


图 3 实时图测量及剖面的位置形状示意图

Fig.3 Real-time image measurement and schematic diagram of positioning shape of profile

地形匹配过程中,以惯导指示的位置为中心,与最大容许导航误差相适应的正方形区域定义为搜索区,如图 4 所示。实际的搜索区域是根据 INS 的指示位置和定位误差的大小确定的。在图 4 中,  $P$  为当前 INS 指示的位置,  $\sigma$  为导航误差的标准偏差,实际的搜索范围为以  $P$  为中心的  $6\sigma \times 6\sigma$  的矩形区域。

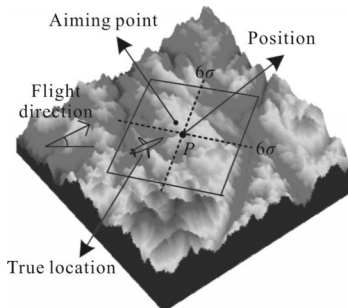


图 4 实际的地形匹配搜索区域范围

Fig.4 True search region scope of terrain matching

基于粒子群优化的飞行器地形匹配算法包括确定粒子适应度函数、地形剖面像元高度特征参量和地形搜索匹配区域。设基准子图为  $X=(x_1,x_2,\dots,x_N)^T$ ,实时图为  $Y=(y_1,y_2,\dots,y_N)^T$ ,这里  $N$  为像元个数,  $x_i$  和  $y_i$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) 分别为基准剖面 and 实测剖面像元。因为实时图和基准子图可能存在差异,所以比较两个剖面的相象程度时通常采用相关度量。因此,文中粒子适应度函数选用归一化积相关函数 (Normal Production Correlation Algorithm, NPROD):

$$NPROD(X,Y) \triangleq \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{\left[ \sum_{i=1}^N x_i^2 \right]^{1/2} \left[ \sum_{i=1}^N y_i^2 \right]^{1/2}} \quad (6)$$

NPROD(X,Y)也是由最大度量值给出最佳匹配。NPROD 算法实际上是按矢量 X 和 Y 的夹角的余弦定义的。基于 PSO 的飞行器地磁相关匹配算法流程如下。

(1)以 INS 指示位置为中心,以最大容许导航误差  $6\sigma$  为半径构造求解空间,同时计算  $6\sigma \times 6\sigma$  区域内格网数  $N_{grid}$ ,在求解空间随机地产生初始化的粒子种群,群体规模为  $0.3N_{grid}$ 。种群中的粒子为地形剖面像元高度特征参量  $h_i$ ,其中  $i=1,2,\dots,M$ ,相应地对每个粒子随机初始定义其飞行的速度  $V_i$ 。

(2)为评价粒子位置的优劣,引入粒子  $h_i$  的适应度,并计算出每个粒子的适应度,求解粒子适应度的步骤如下:

①从粒子群体中挑选出第  $i$  个粒子  $h_i$ ,作为地形剖面像元高度特征参量。

②将得到的地形剖面像元高度作为参数,代入归一化积相关函数 NPROD 中,比较基准子图和实时图剖面的相象程度,求出该粒子的目标函数  $f(h_i)$ ,并将其作为粒子的适应度  $fitness(x,y)=NPROD(X,Y)$ 。

(3)比较适应度函数的大小,根据每个粒子的适应度函数,将粒子个体  $h_i$  迄今搜索到的最佳位置记为  $P_{best}$ ,将整个粒子群迄今搜索到的最佳位置记为  $g_{best}$ 。

(4)根据下面的两个式子调整粒子的速度和位置:

$$V_i(k+1)=\omega * V_i(k)+c_1 * r_1 * (p_{best}-h_i(k))+c_2 * r_2 * (g_{best}-h_i(k)) \quad (7)$$

$$h_i(k+1)=h_i(k)+K * V_i(k+1) \quad (8)$$

式中: $i=1,2,\dots,M$ ;  $c_1$  和  $c_2$  是非负的常数,为加速度常数; $r_1$  和  $r_2$  为  $[0,1]$  之间的随机数; $\omega$  是惯性权值,反映了算法在全局搜索和局部搜索之间的折衷,大的  $\omega$  倾向于全局搜索,小的  $\omega$  则倾向于局部搜索。 $\omega$  一般随搜索的进行逐渐减小。

(5)重复上述(2)~(4)的过程,直到适应度函数达到最优或满足终止的迭代代数条件。

#### 4 基于 PSO 的飞行器地形匹配仿真分析

鉴于当短时间内 INS 漂移不大,按照 INS 给出的方位信息足以比较精确描述飞行器在匹配区域内

飞行航线的整体形状和走向时,可根据速度、航向调整雷达采样的时间进行等间距采集。假设飞行器以恒定速度和航向角飞行,飞行器飞行速度为 50,航向角为 140,采样次数为 64,高度测量均方根误差为 10,惯导均方根误差 X 方向为 50,Y 方向为 20,飞行器速度误差为 2,飞行器航向角误差为 1.2,图 5 为三维仿真数字地形。

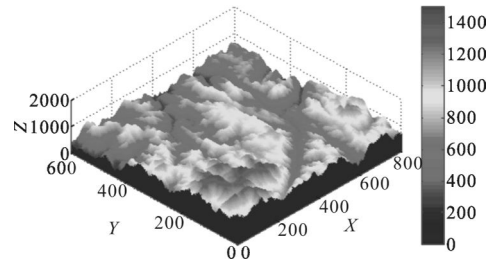


图 5 三维仿真数字地形

Fig.5 Three-dimensional digital terrain simulation

仿真程序的开发环境为 Microsoft Visual C++ 6.0 和 Matlab7.0,程序的测试环境为:Genuine Intel(R),双核 1.60 GHz CPU,512 MB 内存,Microsoft Windows XP Professional 操作系统。考虑飞行器以某一航迹航行,在仿真地形数据的基础上,进行匹配区域选择后,设计航行路线,也就是确定航线的起始和结束位置、航行的速度和航向,并采用基于 PSO 优化的地形匹配算法进行导航,图 6 为采用传统 TERCOM 地形匹配算法所形成的航迹,图 7 为采用基于 PSO 地形匹配新算法所形成的航迹,表 1 为 TERCOM 和 PSO 匹配算法匹配结果对比。

通过以上的仿真计算可以看出,基于 PSO 的地形匹配辅助导航可以大大降低导航匹配误差,将传

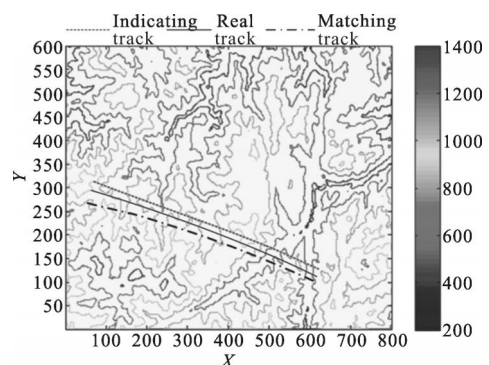


图 6 基于 MSD 的 TERCOM 地形匹配算法所形成的航迹

Fig.6 Path of TERCOM terrain matching algorithm based on MSD

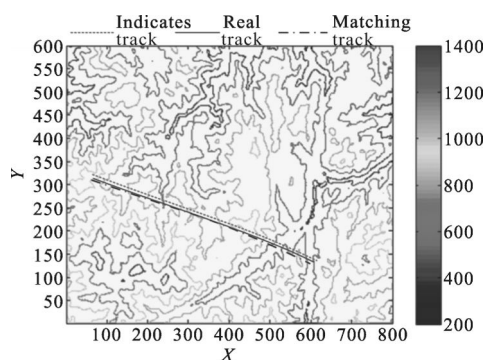


图 7 基于 PSO 地形匹配新算法所形成的航迹

Fig.7 Path of new terrain matching algorithm based on PSD

统基于 MSD 的 TERCOM 地形匹配算法误差从 65 m 左右降低到 6 m 左右, 匹配精度提高了近 10 倍, 算法运行时间较传统 TERCOM 地形匹配算法耗时, 算法时间增时近 2 倍。因此, 从匹配精度来说, 基于粒子群优化的地形匹配精度比传统 TERCOM 地形匹配算法要好; 从匹配时间来说, 基于粒子群优化的地形匹配算法较传统 TERCOM 地形匹配算法来说不具备优势, 匹配时间虽较 TERCOM 算法略长, 但仍满足实时性要求。因此, 在实际应用中, 基于粒子群优化的地形匹配算法更具优势。

表 1 两种匹配算法匹配结果对比

Tab.1 Comparison of matching results of two kinds of matching algorithm

Matching number	Points unmatching		TERCOM based on MSD				Terrain matching algorithm based on PSO			
			Matching point and error/m				Matching point and error/m			
	X	Y	X	Y	R	T/s	X	Y	R	T/s
1	102.1	321.2	105	275	58.722 3	0.23	103	315	7.542 3	1.57
2	105.3	319.1	102	256	61.669 3	0.91	106	317	5.223 6	1.78
3	107.4	318.3	104	232	64.750 2	0.38	104	319	6.102 4	1.32
4	109.2	317.5	111	230	65.524 1	0.69	110	317	5.452 1	1.76
5	112.2	315.3	118	242	69.653 2	0.56	114	312	6.751 2	1.67
6	117.6	314.5	112	246	71.554 6	0.86	116	312	6.564 2	1.56
7	119.7	310.6	116	251	73.547 8	0.36	118	311	5.125 7	1.23

## 5 结束语

基于 POS 的地形匹配算法充分利用了 PSO 优化算法具有较高的寻优效率, 能避免搜索过程陷入局部极小点的优势, 通过采用归一化积相关函数作为粒子适应度函数, 通过适应度最大度量值来比较基准子图和实时图剖面的相似程度, 提高了传统地形匹配算法的定位精度。基于 PSO 的地形匹配辅助导航可以大大降低导航匹配误差, 将传统基于 MSD 的 TERCOM 地形匹配算法误差从 65 m 左右降低到 6 m 左右, 匹配精度提高了近 10 倍, 算法运行时间较传统 TERCOM 地形匹配算法耗时, 但仍满足实时性要求。

### 参考文献:

[1] Wu Kang, Zhao Long. Alogorithm research on navigation matching apply to airlines[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2010, 32(5): 754-761. (in Chinese)  
吴康, 赵龙. 适用航空的导航匹配算法研究[J]. *压电与声*

光, 2010, 32(5): 754-761.

[2] Li Xiongwei, Liu Jianye, Kang Guohua. Development and application of TERCOM elevation-aided navigation system [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2006, 14(1): 34-40. (in Chinese)  
李雄伟, 刘建业, 康国华. TERCOM 地形高程辅助导航系统发展及应用研究[J]. *中国惯性技术学报*, 2006, 14(1): 34-40.  
[3] Liu Hong, Gao Yongqi, Shen Jian. Under water terrain matching techniques based on combination of PMF and TERCOM algorithms[J]. *Torpedo Technology*, 2012, 20(6): 437-442. (in Chinese)  
刘洪, 高永琪, 湛剑. 基于 PMF 和 TERCOM 组合算法的水下地形匹配技术[J]. *鱼雷技术*, 2012, 20(6): 437-442.  
[4] Yan Li, Cui Chenfeng, Wu Hualin. A gravity matching algorithm based on TERCOM[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(3): 261-264. (in Chinese)  
闫利, 崔晨风, 吴华玲. 基于 TERCOM 算法的重力匹配[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2009, 34(3): 261-264.  
[5] Zhao Jianhu, Wang Shengping, Wang Aixue. An improved

- TERCOM algorithm for underwater geomagnetic matching navigation[J]. *Science of Wuhan University*, 2009, 34(11): 1320–1322.
- [6] Wang Shengping, Zhang Hongmei, Zhao Jianhu, et al. Marine geomagnetic navigation technology based on integration of TERCOM and ICCP [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(10): 1209–1212. (in Chinese)  
王胜平, 张红梅, 赵建虎, 等. 利用 TERCOM 与 ICCP 进行联合地磁匹配导航[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(10): 1209–1212.
- [7] Lv Wentao, Wang Honglun, Liu Chang, et al. Design and simulation of terrain matching aided navigation system for UAVs[J]. *Electronics Optics & Control*, 2014, 21(5): 63–67. (in Chinese)  
吕文涛, 王宏伦, 刘畅, 等. 无人机地形匹配辅助导航系统设计仿真[J]. 电光与控制, 2014, 21(5): 63–67.
- [8] Zhang Tao, Xu Xiaosu, Li Peijuan. Underwater terrain matching algorithm based on chaotic optimization[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2009, 17(2): 156–164. (in Chinese)  
张涛, 徐晓苏, 李佩娟. 混沌优化水下地形匹配算法研究[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(2): 156–164.
- [9] Xu Zunyi, Wei Dong, Li Jing, et al. Simulation research on the correlation matching algorithm based on particle swarm optimization for aircraft geomagnetic aid navigation [J]. *Ship Science and Technology*, 2011, 33(11): 3–6. (in Chinese)  
徐遵义, 魏东, 李璟, 等. 基于粒子群优化的飞行器地磁相关匹配新算法仿真[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(11): 3–6.
- [10] Zhang Kai, Zhao Jianhu, Wang Qie. Study on recognition and classification of appropriate matching area for underwater navigation based on SVM[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2013, 33(6): 72–77. (in Chinese)  
张凯, 赵建虎, 王锲. 基于支持向量机的水下地形匹配导航中适配区划分方法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(6): 72–77.