引文格式:席梦寒,武凛,李倩倩,等.重力匹配导航基准图特征提取及适配性分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(1):53-62.DOI:10.13203/j.whugis20220389

Citation: XI Menghan, WU Lin, LI Qianqian, et al. Feature Extraction and Suitability Analysis of Gravity Matching Navigation Reference Map[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(1):53-62.DOI:10.13203/j.whugis20220389

重力匹配导航基准图特征提取及适配性分析

席梦寒[1,2] 武 凛[1] 李倩倩[1] 鲍李峰[1,2] 孙和平[1,2]

1 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院,湖北 武汉,430077

2 中国科学院大学,北京,100049

摘 要:重力匹配辅助导航的定位精度与航行区域的重力场分布密切相关,因此导航适配区的选取对保障重力匹配导航的性能至关重要。选取高精度卫星测高全球海洋重力场模型数据,分别针对全球海域、中国南海及西太平洋海域,对不同尺度的重力导航基准图进行多参量特征分析,根据特征参数计算结果对导航适配区排序和分级,开展了多参量的海洋重力匹配导航适配区选取,并在中国南海及西太平洋海域中进行了匹配导航仿真验证。对比实验结果表明,导航适配区等级越高,该区域内的重力匹配导航的平均定位精度越高。不同导航适配区的特征参数变化趋势与适配区的匹配定位精度变化趋势具有显著的相关性和一致性。

关键词:重力匹配辅助导航;适配性分析;导航基准图;重力场特征提取

中图分类号:P223 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-04-19

DOI:10.13203/j.whugis20220389 **文章编号**:1671-8860(2025)01-0053-10

Feature Extraction and Suitability Analysis of Gravity Matching Navigation Reference Map

XI Menghan[1,2] *WU Lin*[1] *LI Qianqian*[1] *BAO Lifeng*[1,2] *SUN Heping*[1,2]

1 Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: **Objectives**: Gravity matching aided navigation has gradually become a research hotspot in the field of underwater integrated navigation. Its positioning accuracy is closely related to the gravity variation characteristics of the navigation area, so the selection of navigation suitable matching area is very important to ensure the performance of gravity matching aided navigation. In the selection of matching areas for gravity navigation, the previous methods mainly focus on small-scale local simulation data, and the differences in gravity field characteristics between different sea areas are not fully considered. We select high-precision satellite altimetry global ocean gravity field model data to conduct multi-parameter characteristics analysis of gravity navigation reference maps at different scales. **Methods**: We analyze the multi-parameter characteristics of gravity navigation reference maps at different scales for the global sea area, the South China Sea and the Western Pacific Ocean. The global sea area was divided into 23 areas, and the South China Sea and the Western Pacific Ocean into 20 areas. By calculating multiple characteristic parameters of each area, the global sea area large-scale and local sea area gravity matching navigation suitable matching areas were graded. A multi-parameter marine gravity matching navigation matching area was selected, and the matching navigation simulation was carried out in the South China Sea and the Western Pacific Ocean. The selection of suitable matching areas for marine gravity matching navigation is based on evaluating the strength of local gravity field variation. By comparing the matching navigation test results of different navigation suitable

基金项目:国家自然科学基金(42192535,42274116,42192533,42174102,41931076);海南省科技专项(ZDYF2024SHFZ086);中国科学院基础前沿科学研究计划(ZDBS-LY-DQC028)。

第一作者:席梦寒,博士,主要从事重力导航基准图和特征库构建等研究。ximenghan21@mails.ucas.ac.cn

通信作者:武凛,副研究员。linwu@apm.ac.cn

matching areas, the corresponding relationship between the local gravity field variation of the area and the matching navigation performance is established. Specific steps are as follows: (1) Gravity matching navigation sea area partition. (2) Calculation of local characteristics and assessment of information richness. (3) Sorting, grading and selection of navigation matching area. (4) Performance verification of matching navigation and positioning. **Results:** The test results show that the higher the level of navigation matching area, the higher the average positioning accuracy of gravity matching navigation in this area. There is a significant correlation and consistency between the gravity matching navigation and positioning accuracy in different areas and the variation trend of local gravity field characteristic parameters. The results of navigation matching area selection of gravity field characteristic parameters have high reliability, and the selected higher level navigation matching area can generally obtain higher accuracy of matching navigation and positioning. Therefore, the partition and selection results of navigation matching areas can clearly and reliably reflect the matching navigation and positioning effects of different areas, so as to provide an important reference for ocean tests and route planning. **Conclusions:** Improvement and elaboration of marine/underwater gravity matching navigation reference map and accurate assessment of gravity navigation reference map will further enhance the accuracy and reliability of the matching area selection for gravity matching navigation. At the same time, it will also significantly improve the stability and robustness of the underwater gravity matching aided navigation system, and provide a more solid technical support for the passive underwater long endurance autonomous navigation positioning.

Key words: gravity matching aided navigation; suitability analysis; navigation reference map; feature extraction of gravity field

中国的各类海洋活动日益频繁,在海洋探测、海底资源勘探、国防安全等多个领域,都迫切需要长航时高精度的水下导航定位技术。目前,水下潜器的导航定位主要通过组合导航技术来实现,需要利用辅助手段来修正惯性导航随时间积累的误差[1-6]。近年来,重力匹配辅助导航成为水下组合导航领域的研究热点之一,其基本原理是水下载体在航行过程中通过搭载的重力传感器获取重力场特征,将实测重力信息与预先装配的导航基准图数据库进行对比,利用匹配定位算法得到最佳匹配位置[7-8]。地球重力场具有稳定可靠、不易被干扰的特点,在测量重力场信息时,既不向外发射信号也不需要接收外部信号,因此重力匹配辅助导航成为实现水下无源自主导航的重要技术手段之一[9-11]。重力匹配辅助导航定位的性能一定程度上取决于航行区域的重力场特征,在重力场变化剧烈、特征明显的区域航行时,重力匹配辅助导航可获得更高的定位精度和更好的稳定性;相反地,在重力变化较为缓慢、重力场特征相对缺乏的区域,匹配导航的定位精度会显著降低,甚至出现误匹配。由于不同区域的重力场特征分布不同,因此导航适配区的选择对保障匹配导航的性能至关重要,可为海洋实验设计、航行路径规划提供重要参考。近年来,多位学者在适配区选取方面开展了深入研究,形成了以下两类方法:(1)利用单个特征参数进行选取重力导航适配区,这类特征参数主要有重力场标准差、重力场粗糙度、重力场信息熵和相关系数等[12-15];(2)多个特征参数融合的导航适配区选取,融合方法主要是利用多指标的综合评价方法对各个特征参数进行定权,主要的综合评价方法有主成分分析法、层次分析法[16]、模糊综合评价法和熵值法[17-18]等。但以上方法在进行重力导航适配区选取时,多针对小尺度的局部仿真数据开展研究,未充分考虑不同海域之间重力场特征的差异。

本文在前期研究的基础上,利用空间分辨率1′×1′的全球海洋测高重力场模型,分别针对全球海域、中国南海及西太平洋海域开展导航适配区选取研究。将全球海域划分成23个分区,中国南海及西太平洋海域划分成20个分区,通过计算各个分区的多个特征参数,对全球海域大尺度和局部海域尺度的重力匹配导航适配区进行了等级划分,并对中国南海与西太平洋导航适配区选取结果进行了重力匹配导航仿真实验验证。

1 重力场特征参数

重力匹配导航的定位精度与航行区域的特征分布密切相关,在重力场变化显著的区域,通常能够得到更好的定位精度。重力场特征参数

通常用于描述区域重力场变化剧烈程度或重力场特征丰富程度。常用的重力场特征参数有重力场标准差、重力场粗糙度、重力场信息熵、平均重力变化和重力场坡度等,这些参数针对局部重力场起伏特征、光滑程度和离散程度等不同属性进行表征,能够反映出局部重力场的信息丰富程度,因此单一或多个重力场特征可作为导航适配区选取的有效手段。假定格网化区域海洋重力场的大小为 $m\times n$(m 为数据行数,n 为列数),$g(i,j)$为坐标(i,j)处的重力异常数值,各特征参数的计算如下。

1)重力场标准差。标准差是数据样本中各数值与其平均值的差值平方的算术平均数的平方根,它反映数据样本的离散程度。重力场标准差σ的计算公式为:

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

其中,

$$\bar{g}=\frac{1}{mn}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}g(i,j) \tag{2}$$

2)重力场粗糙度。粗糙度是用来描述局部区域重力趋势面的平均光滑程度,能够刻画较细微的局部起伏,其值越大,说明重力场变化越明显。重力场粗糙度r计算公式为:

$$r=\sqrt{{r_x}^2+{r_y}^2} \tag{3}$$

$$r_x=\frac{1}{n(m-1)}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n-1}[g(i,j)-g(i,j+1)] \tag{4}$$

$$r_y=\frac{1}{m(n-1)}\sum_{i=1}^{m-1}\sum_{j=1}^{n}[g(i,j)-g(i+1,j)] \tag{5}$$

式中,r为重力场粗糙度;r_x为x方向粗糙度;r_y为y方向粗糙度。

3)重力场信息熵。信息熵定义为离散随机事件出现的概率,概率越高意味着时间的不确定性就会越高,熵值就会越大。因此,其值越小,代表该数据值越独特,信息丰富程度越高。重力场信息熵H的计算公式为:

$$H=-\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}P_{ij}\log_2 P_{ij} \tag{6}$$

式中,$P_{ij}=\dfrac{g(i,j)}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}g(i,j)}$为$g(i,j)$在重力场区域中出现的概率。

4)重力场相关系数。相关系数R反映了数据间的相关性,其数值越接近0,说明数据间相关性越差,该数据区域的重力场变化就越剧烈;反之,其数值越接近1,说明数据间的相关性较强,该数据区域的重力场变化越平缓。其计算公式为:

$$R=\frac{R_\lambda+R_\phi}{2} \tag{7}$$

$$R_\lambda=\frac{1}{(m-1)n\sigma^2}\times\sum_{i=1}^{m-1}\sum_{j=1}^{n}\{[g(i,j)-\bar{g}][g(i+1,j)-\bar{g}]\} \tag{8}$$

$$R_\phi=\frac{1}{(n-1)m\sigma^2}\times\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n-1}\{[g(i,j)-\bar{g}][g(i,j+1)-\bar{g}]\} \tag{9}$$

式中,R_λ为经向相关系数;R_ϕ为纬向相关系数。

5)平均重力变化。主要描述了重力数据中相邻网格之间重力异常差值的平均值,其值越大,说明区域重力场变化越明显。平均重力变化A的计算公式为:

$$A=\frac{\dfrac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n-1}\sigma_{ij}}{m(n-1)}+\dfrac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m-1}\omega_{ij}}{n(m-1)}}{2} \tag{10}$$

式中,$\sigma_{ij}=\left|g(i,j)-g(i,j+1)\right|$、$\omega_{ij}=\left|g(i,j)-g(i+1,j)\right|$分别为$x$、$y$方向相邻格网间的重力差异。

6)重力场坡度。描述了重力场局部区域的起伏变化程度,其值越大,说明重力场变化越剧烈。坡度s的计算公式为:

$$s=\sqrt{{S_\lambda}^2+{S_\phi}^2} \tag{11}$$

$$S_\lambda=\frac{\sum_{k=1}^{m-9}\sum_{l=1}^{n-9}T_\lambda}{(m-9)(n-9)} \tag{12}$$

$$T_\lambda=\sum_{i=k+1}^{k+8}\sum_{j=l+1}^{l+8}\left\{\frac{1}{6}[g(i+1,j+1)+g(i+1,j)+g(i+1,j-1)-g(i-1,j+1)-g(i-1,j)-g(i-1,j-1)]\right\} \tag{13}$$

$$S_\phi=\frac{\sum_{k=1}^{m-9}\sum_{l=1}^{n-9}T_\phi}{(m-9)(n-9)} \tag{14}$$

$$T_\phi=\sum_{i=k+1}^{k+8}\sum_{j=l+1}^{l+8}\left\{\frac{1}{6}[g(i-1,j+1)+g(i,j+1)+\right.$$

$$g(i+1,j+1)-g(i-1,j-1)-$$
$$g(i,j-1)-g(i+1,j-1)\,]\}\quad(15)$$

式中,s为重力场坡度;S_λ为纬度方向坡度;S_ϕ为经度方向坡度。

本文选取了3处海域,其重力场分布的二维和三维示意图如图1所示,可以直观看出海域一的重力场特征变化最为平缓,而海域三的重力场特征变化最为剧烈。按照式(1)~(15)分别计算3处海域的重力场特征参数,结果如表1所示,可以看出,6种特征参数都可以基本反映出不同变化程度的区域重力场分布。

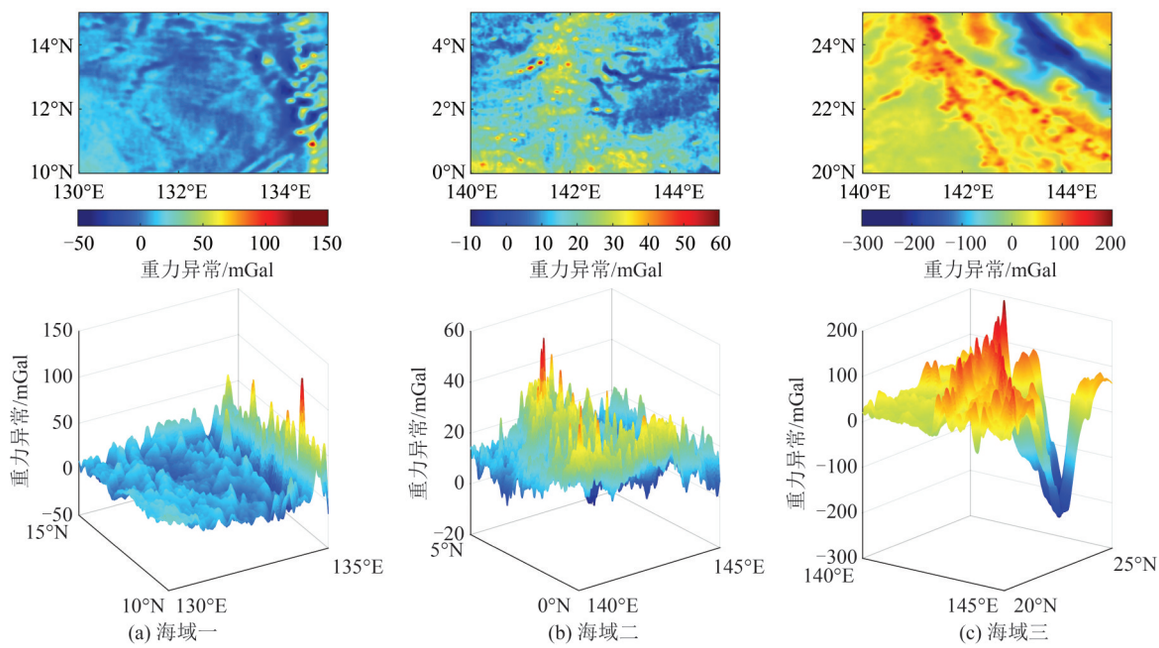


图1 不同海域的重力场分布图

Fig. 1 Distribution of Gravity Field in Different Sea Areas

表1 不同海域的重力场特征参数

Table 1 Characteristic Parameters of Gravity Field in Different Sea Areas

海域编号	标准差/(mGal·n mile^{-1})	粗糙度/(mGal·n mile^{-1})	信息熵/bit	相关系数	平均重力变化/(mGal·n mile^{-1})	重力场坡度/(mGal·n mile^{-1})
一	7.731	1.203	1.460	0.984	0.848	6.683
二	12.165	1.592	1.450	0.924	1.121	9.172
三	74.436	3.509	1.448	0.772	2.470	20.610

前期研究表明,相比其他几种特征参数,平均重力变化和重力场坡度具有特征值分布均匀、差异显著、层次丰富等特点[19],因此本文选择这两种特征参数来进行海洋重力匹配导航适配区的划分和选取。

2 海洋重力匹配导航适配区选取方法

海洋重力匹配导航适配区选取,是以评估局部区域的重力场特征变化剧烈程度为核心,通过不同导航适配区的匹配导航实验进行对比验证,建立区域重力场特征与该区域内重力匹配导航定位性能的对应关系,从而为重力匹配辅助导航海洋实验、航路规划、水下导航性能评估等提供重要参考信息。如图2所示,导航适配区提取主要包含以下几个步骤:

1)重力匹配导航海域分区。确定导航适配区选取和匹配导航性能评估的目标海域,将该海域的海洋重力背景场进行合理分区,如图2所示。

2)区域特征计算和信息丰富程度评估。针对各个分区进行区域特征提取和计算,评估该区域重力变化特征信息丰富程度。

3)导航适配区排序、分级和选取。根据特征参数和信息评估结果,对各个分区进行导航适配区排序,根据一定的等级划分准则对各个分区进行适配区分级和选取。

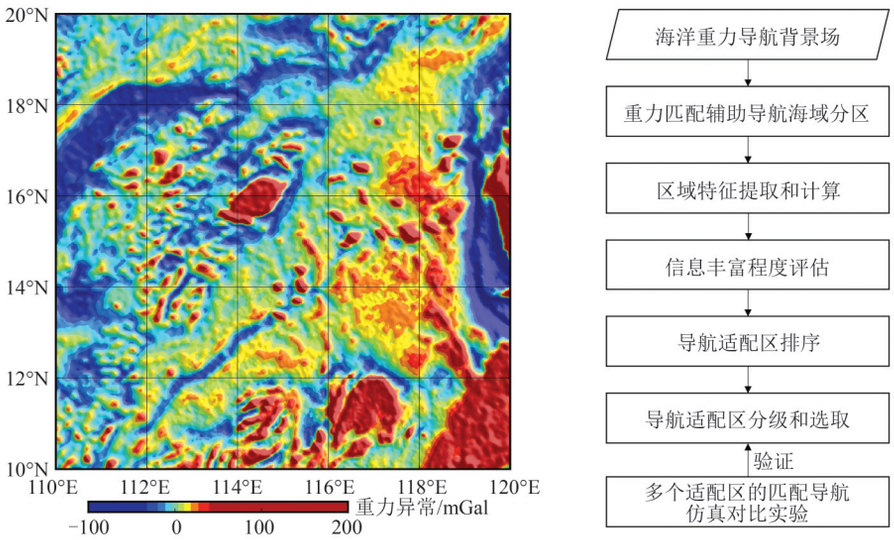


图 2　海洋重力匹配导航适配区提取

Fig. 2　Matching Area Extraction for Marine Gravity Matching Navigation

4)匹配导航定位性能验证。在不同的导航适配区开展充分的匹配导航定位仿真实验,统计各个分区的匹配导航平均定位精度,分析不同分区的定位精度变化趋势,并评估定位精度与重力场特征之间的相关性。

3　海洋重力匹配导航适配区选取和验证

利用加州大学圣迭戈分校 Scripps 海洋研究所 Sandwell 团队发布的 SS 30.1 全球海洋重力场模型作为海洋重力背景场,该模型是国际上精度较高的海洋重力场模型之一,通过多代卫星测高数据和船载重力测量数据融合,空间分辨率为 1′×1′(1′=1 n mile=1 852 m),精度为 2~3 mGal(1 mGal = 1 × 10^{-5} m/s^2),范围为经度 0°到 360°,纬度 80°S 到 80°N[20-21]。

针对全球海域、中国南海及西太平洋海域,分别采取两种尺度分区,开展平均重力变化和重力场坡度多参量的重力匹配导航适配区选取。

3.1　全球海域重力匹配导航适配区选取

全球海域的重力异常背景场如图 3 所示,排除陆地占比大于 55% 的区域,即图中灰色区域中陆地占比较大。将全球主要海域作大尺度划分,得到 23 个分区,其中分区大小有 50°×35°、50°×50°、50°×25°和 60°×50°等几种,对各个分区依次编号为 GM_1 到 GM_23,例如经度 150°到 200°、纬度 45°N 到 80°N 为 GM_1 分区;经度 200°到 250°、纬度 45°N 到 80°N 为 GM_2 分区等。

计算各个分区的平均重力变化值,平均重力变化值越大,说明该分区重力场变化越剧烈、重力场特征越丰富。将平均重力变化值计算结果从大到小进行排序,选取其中数值最大、排序第 1 至第 4 位的 4 个区域选为 A 等级适配区,其适配性最强,预计这些区域内匹配导航定位效果最好;将平均重力变化数值排序第 5 至第 8 位的 4 个区域选为 B 等级适配区,其适配性低于 A 等级区域;数值最小的 4 个区域选为 D 等级适配区,其适配性最差;其余区域选为 C 等级适配区,其适配性在 B 等级适配区和 D 等级适配区之间。类似地,计算各个分区的重力场坡度值,根据计算结果排序进行适配区分级。全球海域各分区重力场特征参数和适配区分级结果如表 2 所示。

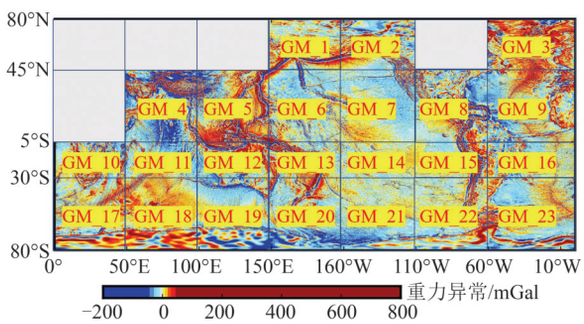


图 3　全球海域重力异常背景场和分区示意图

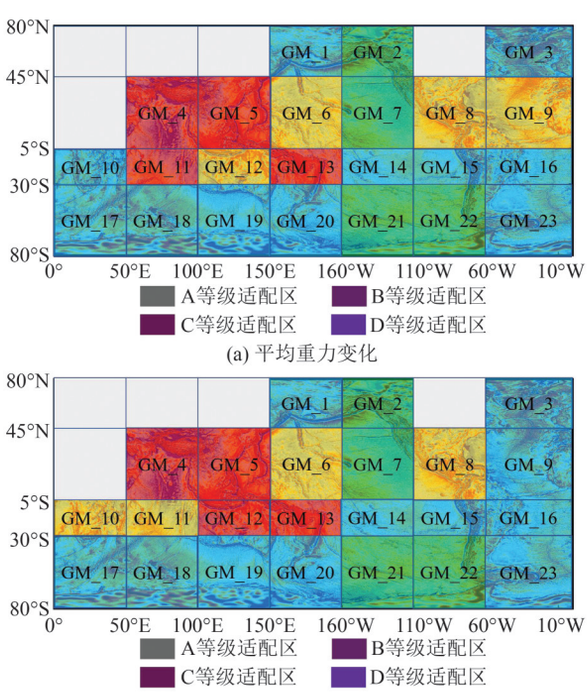
Fig. 3　Diagram of Global Ocean Gravity Anomaly Background Field and Zoning

将 A 等级区域填充为红色,B 等级区域填充为橙色,C 等级区域填充为蓝色,D 等级区域填充为绿色。全球海域重力匹配导航适配区分级和选取结果如图 4 所示,其中图 4(a)为平均重力变化的导航适配区选取结果,图 4(b)为重力场坡度的导航适配区选取结果。

表2 全球海域各分区重力场特征参数和适配区分级结果

Table 2 Characteristic Parameters of Gravity Field and Classification Results of Matching Area in Each Test Area of Global Ocean

分区编号	平均重力变化/(mGal·n mile^{-1})	区域等级	重力场坡度/(mGal·n mile^{-1})	区域等级
GM_1	0.743	C	40.756	C
GM_2	0.547	D	27.541	D
GM_3	0.734	C	38.637	C
GM_4	1.493	A	70.019	A
GM_5	1.966	A	97.917	A
GM_6	1.254	B	62.254	B
GM_7	0.708	D	26.826	D
GM_8	1.292	B	58.191	B
GM_9	1.193	B	53.704	C
GM_10	1.163	C	55.690	B
GM_11	1.469	A	67.986	B
GM_12	1.454	B	69.953	A
GM_13	1.826	A	90.269	A
GM_14	1.018	C	40.767	C
GM_15	1.145	C	47.907	C
GM_16	1.131	C	48.978	C
GM_17	1.000	C	51.198	C
GM_18	0.835	C	39.064	C
GM_19	0.728	C	34.158	C
GM_20	0.902	C	45.743	C
GM_21	0.636	D	28.935	D
GM_22	0.699	D	32.777	D
GM_23	0.844	C	40.816	C



(a) 平均重力变化

(b) 重力场坡度

图4 多参量的全球海域重力匹配导航适配区选取

Fig. 4 Selection of Matching Area for Multi-parameter Global Ocean Gravity Matching Navigation

3.2 中国南海及西太平洋海域重力匹配导航适配区选取

在全球海域重力匹配导航适配区选取的基础上缩小尺度,针对全球海域分区中经度100°到150°、纬度5°S到45°N的GM_5分区(即中国南海及西太平洋海域)进一步进行划分。同样地,排除陆地占比大于55%的区域,即图中灰色区域中陆地占比较大。划分后得到20个大小为10°×10°或10°×5°的分区,对各个分区依次编号为SCS_1到SCS_20。该分区方式一方面是为了使得各实验区域面积尽可能一致,有利于不同实验区域之间特征分布和适配性的横向对比,避免了陆地对适配区选取的影响;另一方面是各分区大小与通常海洋调查区域范围相近,有利于更精细化尺度的重力特征分布和适配性分析,且划分时充分考虑到了研究相关的热点海域,如SCS_9分区是中国南海北部海域,SCS_3分区为中国的渤海、黄海、东海等海域,SCS_6则是中国台湾海域及中国台湾东部海域等。分区情况如图5所示。

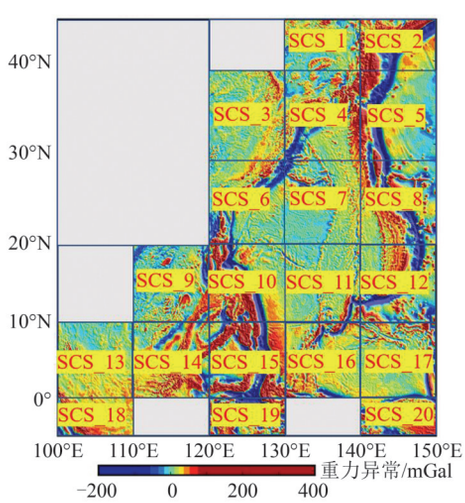


图5 中国南海及西太平洋海域分区示意图

Fig. 5 Zoning Diagram of the South China Sea and the Western Pacific Ocean

采取与§3.1的类似方法,计算各个分区的平均重力变化和重力场坡度,根据结果对分区进行排序和等级划分。将特征参数从大到小进行排序:将排序第1至第4位的4个区域选为A等级适配区,其适配性最强;排序第5至第8位的4个区域选为B等级适配区;排序最后的4个区域选为D等级适配区;其余区域选为C等级适配区。

将A等级区域填充为红色,B等级区域填充为橙色,C等级区域填充为蓝色,D等级区域填充为绿色。A、B、C、D 4个等级的适配区,其适配性依次降低。各分区特征参数和适配区分级结果

如表3所示,适配区分布如图6所示。

表3　中国南海及西太平洋海域重力场特征参数和适配区分级结果

Table 3　Characteristic Parameters of Gravity Field and Classification Results of Matching Area in Each Test Area of the South China Sea and the Western Pacific Ocean

分区编号	平均重力变化/(mGal·n mile^{-1})	区域等级	重力场坡度/(mGal·n mile^{-1})	区域等级
SCS_1	1.241	D	59.913	D
SCS_2	2.030	B	116.891	B
SCS_3	1.114	D	46.306	D
SCS_4	1.738	C	84.888	C
SCS_5	1.641	C	93.633	C
SCS_6	1.707	C	83.258	C
SCS_7	1.616	C	78.437	C
SCS_8	2.627	A	147.555	A
SCS_9	1.839	C	84.925	C
SCS_10	2.320	B	120.917	B
SCS_11	1.596	C	74.498	C
SCS_12	2.506	A	133.347	A
SCS_13	1.083	D	42.833	D
SCS_14	1.988	C	91.657	C
SCS_15	3.327	A	180.046	A
SCS_16	2.385	B	114.601	B
SCS_17	2.066	B	98.832	B
SCS_18	1.463	D	67.139	D
SCS_19	3.413	A	170.554	A
SCS_20	1.869	C	80.838	C

3.3　适配区选取结果验证

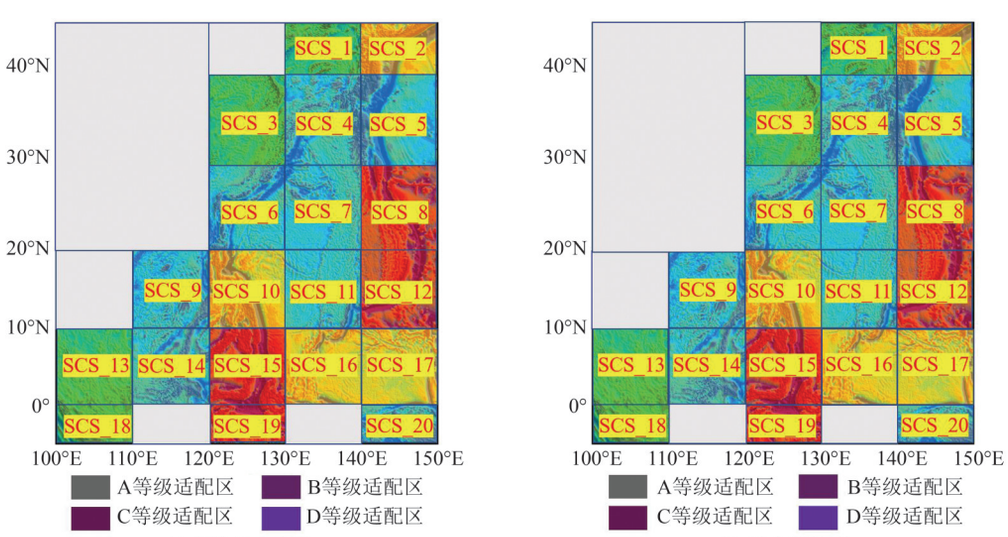
为了对重力匹配导航适配区选取结果进行验证,针对南海及西太平洋海域导航适配区开展匹配导航定位仿真实验。在SCS_1到SCS_20每个分区内,仿真100条空间分布均匀、东西航向、长度均为100 n mile的水下运载体航行轨迹,在模拟测量噪声均值为3 mGal的条件下,采用经典的均方差匹配定位算法(mean square difference, MSD)开展重力匹配导航定位仿真实验,统计该分区内所有航迹的匹配定位结果,计算平均匹配定位精度,结果如表4所示。

将表3、表4中分区SCS_1到SCS_20的平均重力变化、重力场坡度和匹配定位精度绘制成曲线,如图7所示。可以看出,区域重力场特征与匹配定位精度具有明显的相关性,两者的曲线趋势具有显著的一致性。

为了进一步评估不同区域重力场特征参数和匹配定位精度的相关性,计算相关系数C,公式为:

$$C_{XY}=\frac{\sum\left(X-\overline{X}\right)\left(Y-\overline{Y}\right)}{\sqrt{\sum\left(X-\overline{X}\right)^2}\sqrt{\sum\left(Y-\overline{Y}\right)^2}} \tag{16}$$

由于适配性等级较低的区域中,平均重力变化和重力场坡度等特征参数对重力变化特征表征能力不足,因此在去掉部分适配性等级较低的区域情况下,分别得到中国南海及西太平洋海域SCS_1到SCS_20共20个区域的平均重力变化和匹配定位精度的相关系数为0.76,重力场坡度和



(a) 平均重力变化　　(b) 重力场坡度

图6　多参量的中国南海及西太平洋海域重力匹配导航适配区选取

Fig. 6　Selection of Matching Area for Multi-parameter the South China Sea and the Western Pacific Ocean Gravity Matching Navigation

表4 中国南海及西太平洋海域各区域匹配导航平均定位精度

Table 4 Average Positioning Accuracy of Matching Navigation in Each Test Area of the South China Sea and the Western Pacific Ocean

分区编号	平均匹配定位精度/n mile
SCS_1	13.048
SCS_2	0.598
SCS_3	12.948
SCS_4	2.761
SCS_5	19.375
SCS_6	4.949
SCS_7	19.604
SCS_8	1.056
SCS_9	0.683
SCS_10	1.974
SCS_11	25.620
SCS_12	0.832
SCS_13	3.401
SCS_14	1.235
SCS_15	0.854
SCS_16	4.506
SCS_17	4.603
SCS_18	0.280
SCS_19	0.130
SCS_20	0.436

匹配定位精度的相关系数为0.79。

以上结果进一步说明重力场特征参数与匹配定位精度具有强烈的相关性,说明本文多参量海洋重力匹配导航适配区选取的结果能较好地反映不同区域的匹配定位效果。

3.4 分析与讨论

从图4、图6的多参量海洋重力匹配导航适配区选取结果可以看出,由于不同的重力场特征参量均能反映区域重力场变化剧烈程度,因此平均重力变化和重力场坡度所得到的导航适配区选取结果基本一致。

例如全球海域的GM_4、5、6、8、11、12、13分区,南海及西太平洋海域的SCS_2、8、10、12、15、16、17、19分区,在不同的特征参量方法中均被选取为A或B等级适配区,表明从不同尺度上来说,这些海域更适合重力匹配辅助导航定位,预期可得到更好的匹配定位结果;相应地,全球海域的GM_2、7、21、22分区,中国南海及西太平洋海域的SCS_1、3、13、18分区,在不同的特征参量方法中均被标记为D等级适配区。但另一方面,对比图4(a)和4(b)、图6(a)和6(b)可以看出,不同特征参量选取的重力匹配导航适配区结果之间还存在细微差异,如全球海域的GM_9、10等。

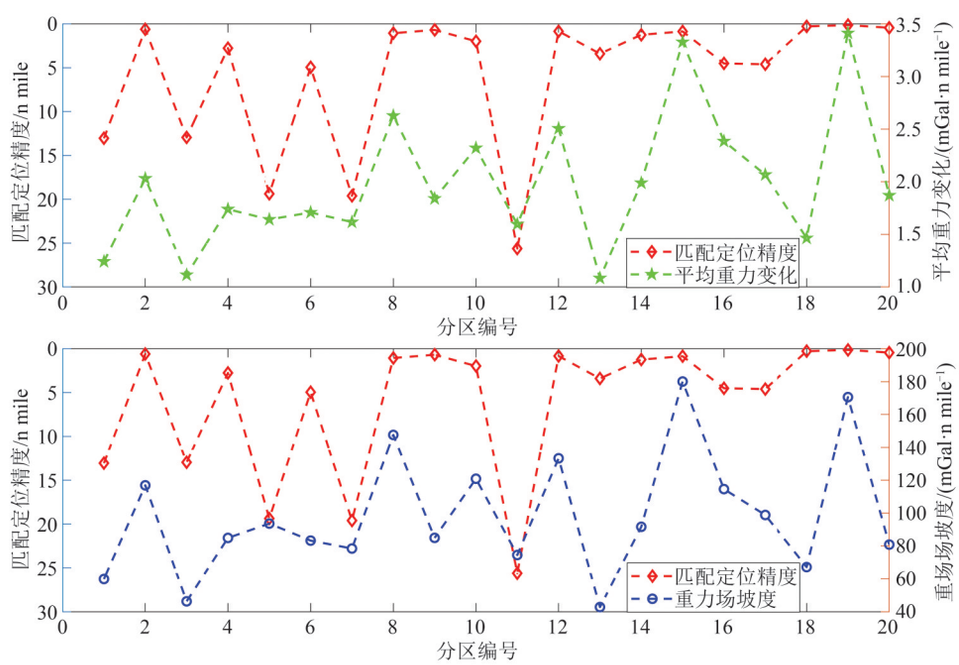


图7 中国南海及西太平洋导航适配区重力场特征参量和匹配定位精度

Fig. 7 Characteristic Parameters of Gravity Field and Matching Positioning Accuracy in Navigation Matching Area of the South China Sea and the Western Pacific Ocean

结合图6和表4的匹配定位实验结果来看,中国南海及西太平洋海域中,被多特征参量同时选为A或B高等级适配区的SCS_2、8、10、12、15、19分区,均在匹配定位仿真实验中得到了成

功验证,在这些区域的匹配导航定位都取得了较高的定位精度。同时,在匹配定位仿真实验中也取得较好定位精度的SCS_18和SCS_20分区,在导航适配区选取中却未能成功标记为A或B高等级适配区。重复性实验表明,原因是与其他分区10°×10°的范围相比,SCS_18和SCS_20区域的范围为10°×5°,面积较小。此外,在这两个分区内,陆地占比分别达到50.1%和23.9%,SCS_18分区中海域面积占比不足一半,只占到SCS_17实验区域海域面积的25%左右,SCS_20分区中的海域面积也仅占到SCS_17实验区域海域面积的38%左右。上述各方面因素使得仿真的匹配定位航迹在SCS_18和SCS_20分区内未能像其他区域一样均匀分布,因此造成了匹配定位实验结果的偏差。

由图7和式(17)~(18)可以看出,以中国南海及西太平洋海域中多个区域为例,区域重力场特征参数与匹配定位精度具有显著的相关性和一致性。导航适配区选取的结果与匹配定位效果之间有良好的对应关系。

此外,从表2和图4可以看出,从全球尺度来说,中国南海及西太平洋海域(GM_5区域)是全球重力场变化最为剧烈、重力场特征最为显著的区域之一,这意味着该区域是全球范围内重力匹配辅助导航的最佳适配区之一,预计可获得高精度的重力匹配导航定位结果。作为中国面向海洋的重要门户和必经之路,这一点具有重要的战略意义。而从表4中匹配导航定位的仿真实验结果可以发现,从更精细化的尺度来看,该海域50%的分区均可取得优于2 n mile的重力匹配导航定位精度,这进一步验证了重力匹配辅助导航在中国南海和西太平洋海域具备极好的适用性。

4　结　语

重力匹配辅助导航定位的效能与航行区域的重力场特征紧密相关,导航适配区的选取对水下重力匹配辅助导航至关重要。本文利用高精度卫星测高全球海洋重力场模型为背景场,分别针对全球海域、中国南海及西太平洋海域开展多尺度、多分量导航适配区选取研究,并针对导航适配区选取结果进行重力匹配导航仿真实验验证。结果表明,多个不同区域的重力匹配导航定位精度与区域重力场特征参数的变化趋势具有显著的相关性和一致性,重力场特征参量的导航适配区选取结果均有较高的可靠性,选取出的较高等级导航适配区一般可获得更高的匹配导航定位精度。因此,本文的导航适配区划分和选取结果可以比较清晰可靠地反映出不同区域的匹配导航定位效果,从而为海洋实验、航路规划提供重要参考。

此外,导航适配区的选取与海洋重力背景场数据源直接相关,选取结果的充分验证也需要开展大量的海洋实验。因此,改进和精化海洋/水下重力匹配导航基准图、精确评估重力导航基准图的精度和稳健性、大力开展各类海洋/水下重力匹配辅助导航定位实验、推进海洋重力基准建设和海洋绝对重力测量,将进一步提高重力匹配导航适配区选取的准确性和可靠性,从而显著提升水下重力匹配辅助导航系统的稳定性和鲁棒性,为中国水下长航时无源自主导航定位提供更坚实的技术支撑。

参　考　文　献

[1] REN H, KAZANZIDES P. Investigation of Attitude Tracking Using an Integrated Inertial and Magnetic Navigation System for Hand-Held Surgical Instruments[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, 17(2):210-217.

[2] KAMGAR-PARSI B. Vehicle Localization on Gravity Maps[C]//SPIE Aerosense, Orlando, FL, USA,1999.

[3] 马明珠. 水下地磁辅助导航匹配算法研究[D]. 南京:东南大学, 2019.
MA Mingzhu. Research on Underwater Geomagnetic Assisted Navigation Matching Algorithm[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.

[4] 张驰. 重力辅助惯性导航的航迹规划与图像匹配方法研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2020.
ZHANG Chi. Research on Track Planning and Image Matching Methods of Gravity-Aided Inertial Navigation[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2020.

[5] 王博,周明龙. 水下重力辅助导航适配区选取的研究进展[J]. 导航定位学报,2020,8(3):32-39.
WANG Bo, ZHOU Minglong. Perspective on Matching Area Selection Technology for Underwater Gravity Aided Navigation[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2020,8(3):32-39.

[6] 种洋,柴洪洲,郭云飞,等. 自组织优化分类的AUV地磁导航适配区选取[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(5):722-730.
CHONG Yang, CHAI Hongzhou, GUO Yunfei, et al. Matching Area Selection for AUV Geomagnetic

Navigation by Self-organizing Optimization Classification [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022,47(5):722-730.

[7] SALAVASIDIS G, MUNAFÒ A, HARRIS C A, et al. Terrain-Aided Navigation for Long-Endurance and Deep-Rated Autonomous Underwater Vehicles [J]. *Journal of Field Robotics*, 2019, 36(2): 447-474.

[8] CLAUS B, BACHMAYER R. Terrain-Aided Navigation for an Underwater Glider[J]. *Journal of Field Robotics*, 2015, 32(7): 935-951.

[9] ADAMEK T, KITTS C A, MAS I. Gradient-Based Cluster Space Navigation for Autonomous Surface Vessels[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 20(2):506-518.

[10] WANG H, WU L, CHAI H, et al. Characteristics of Marine Gravity Anomaly Reference Maps and Accuracy Analysis of Gravity Matching-Aided Navigation[J]. *Sensors*,2017,17(8): 1851.

[11] LIU F M, LI F, JING X. Navigability Analysis of Local Gravity Map With Projection Pursuit-Based Selection Method by Using Gravitation Field Algorithm[J]. *IEEE Access*, 2019,7: 75873-75889.

[12] 李姗姗. 水下重力辅助惯性导航的理论与方法研究[D]. 郑州:信息工程大学,2010.
LI Shanshan. Research on the Theory and Method of Underwater Gravity-Aided Inertial Navigation[D]. Zhengzhou:Information Engineering University,2010.

[13] 朱宇炜. 基于重力信息的航迹规划方法研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016.
ZHU Yuwei. Route Planning Research Based on Gravity Information[D]. Beijing : Beijing Institute of Technology,2016.

[14] WU L, WANG H, CHAI H, et al. Performance Evaluation and Analysis for Gravity Matching Aided Navigation[J]. *Sensors*, 2017,17(4):769.

[15] MELO J, MATOS A. Survey on Advances on Terrain Based Navigation for Autonomous Underwater Vehicles [J]. *Ocean Engineering*, 2017, 139: 250-264.

[16] CAI T J, CHEN X W. Selection Criterion Based on Analytic Hierarchy Process for Matching Region in Gravity Aided INS[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2013,21(1): 93-96.

[17] SONG Z Q, BIAN H Y, ZIELINSKI A, et al. Underwater Terrain Navigability Analysis Based on Image Processing and Fuzzy Decision[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2016,24(2): 164-169.

[18] MA Y Y, OUYANG Y Z, HUANG M T, et al. Selection Method for Gravity-Field Matching Area Based on Information Entropy of Characteristic Parameters[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2016, 24(6): 763-769.

[19] 张璐,武凛,柴华, 等. 一种新的基于特征值融合的重力辅助导航适配区选择方法[J]. 导航与控制, 2018,17(2):32-40.
ZHANG Lu, WU Lin, CHAI Hua, et al. A New Eigenvalues-Fusion Based on Method for Selection of Gravity Matching Areas[J]. *Navigation and Control*, 2018,17(2):32-40.

[20] SANDWELL D T, HARPER H, TOZER B, et al. Gravity Field Recovery from Geodetic Altimeter Missions[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68(2):1059-1072.

[21] SANDWELL D T, MÜLLER R D, SMITH W H, et al. New Global Marine Gravity Model from CryoSat-2 and Jason-1 Reveals Buried Tectonic Structure[J]. *Science*, 2014, 346(6205): 65-67.