

基于重力梯度的潜艇探测方法研究

孙 岚¹, 李厚朴², 边少锋², 李宏武³, 周超烨³

(1. 海军大连舰艇学院 海测工程系, 辽宁 大连 116018;

2. 海军工程大学 导航工程系, 湖北 武汉 430033; 3. 92678 部队, 天津 300060)

摘要:提出了一种基于重力梯度探测潜艇的新方法。借助计算机代数系统 Mathematica, 计算了模拟潜艇在不同位置产生的重力垂直梯度, 分析了其变化情况, 结果表明如果现有的重力梯度仪精度为 $10^{-4}E$, 即使下潜深度达 300m, 在海面上 100m 范围内也能够探测到; 当重力梯度仪的精度达到或超过 $10^{-6}E$ 时, 可在海面上 1000m 范围内实现探测。

关键词:重力梯度; 重力垂直梯度; 潜艇探测; 计算机代数系统

中图分类号: P312

文献标识码: B

文章编号: 1671-3044(2010)02-0024-04

1 引言

潜艇作为能潜入水下活动和作战的舰艇, 具有隐蔽性好、机动性强的特点, 可以携带鱼雷、巡航导弹或弹道导弹等武器装备对各种战略战术目标进行攻击, 是各国军方竞相发展的重要装备, 在现代海战中扮演越来越重要的角色。因此, 各国海军对探潜技术极为重视, 竭力研制各种探测设备和反潜武器。目前, 实用探潜技术主要依赖声纳探测和磁异常探测。随着潜艇航速的增加、“寂静”潜艇的出现以及消磁技术、各种声对抗技术、无磁性艇壳材料的采用, 声纳探测、磁异常探测的能力已被大大削弱, 因而各国正在加速发展非声纳、非磁效应探测技术, 如激光探测、红外热像仪探测、微波遥感探测以及尾迹探测等^[1-3]。目前来说, 这些探测技术或者探潜深度有限, 或者受海洋环境因素影响较大, 存在着这样或那样的缺陷。因此有必要研究新的探潜技术, 使各种探潜手段优势互补, 以适应未来高科技海战的需要。

地球重力场是地球最重要的物理场之一, 它反映了地球表层及内部的密度分布和物质运动状态。重力梯度反映的是重力场在全空间的变化率, 相比于地球重力场, 重力梯度能够反映场源体的细节, 具有比重力本身更高的分辨率, 可以更好探测地下物质的分布及界面起伏^[4-6]。重力梯度仪对重力梯度的测量不受外界信号干扰、不受测区环境的影响、不向外界发射信号, 因此利用重力梯度探测潜艇是一

种无源的探测手段, 不会暴露目标。重力梯度仪的精度从早期的 $1E$ (即 $10^{-9}s^{-2}$) 已发展到 $10^{-4}E$, 未来超导重力梯度仪的精度可望达到 $10^{-6}E$ ^[7]。鉴于此, 本文提出了通过测量重力梯度探测潜艇的新方法, 对模拟艇产生的重力垂直梯度及变化进行了计算分析。

2 基于重力梯度的潜艇探测仿真分析

重力位在铅垂方向的二阶导数 T_z 通常称为重力垂直梯度, 它的分辨能力比重力异常更高, 已在地球物理勘探和水下匹配导航中得到广泛应用^[4]。

为分析方便, 模拟潜艇外形假定为宽度与高度相等的旋转椭球壳, 并且: ①潜艇质量全分布在外壳上; ②潜艇内部为空气。因此由该艇产生的重力垂直梯度包括以下两部分: ①外壳上多余质量产生的重力垂直梯度; ②潜艇内部假定为空气后, 将引起海水质量亏损, 由亏损的海水质量产生的重力垂直梯度。

2.1 潜艇数学模型的建立

潜艇的数学模型取为一旋转椭球面, 如图 1 所示。设该椭球面的方程为:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2 + z^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

式中, a 为椭球长半径; b 为椭球短半径。假定该模型排水量 m 与潜艇一致, 取海水密度 $\rho = 1.03g/cm^3$ 。则该椭球模型的体积为:

收稿日期: 2009-09-20; 修回日期: 2009-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40774002, 40904018)。

作者简介: 孙 岚(1980-), 女, 辽宁大连人, 博士研究生, 主要从事多波束数据处理技术研究。

$$V_e = \frac{m}{\rho} = \frac{4}{3}\pi \cdot a \cdot b^2 \quad (2)$$

取长半径 $a = \frac{149.9}{2} \text{m}$, 由式(2)可得该椭球模型的短半径: $b = 7.03 \text{m}$ 。至此, 潜艇数学模型得以建立。

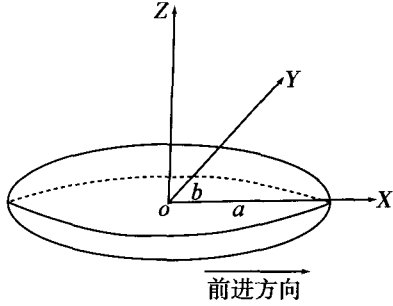


图1 潜艇数学模型

2.2 潜艇外壳多余的质量产生的重力垂直梯度

2.2.1 椭球表面积和面密度的确定

设该椭球的面密度为 σ , 表面积为 S 。其表面积可按式(3)进行计算:

$$S = \iint_{\Sigma} dS \quad (3)$$

考虑该曲面在 yoZ 面上的投影为圆域: $y^2 + z^2 \leq b^2$, 则式(3)可以变换为:

$$S = 2 \iint_{D_z} \sqrt{1 + x_y^2(y, z) + x_z^2(y, z)} dydz \quad (x > 0) \quad (4)$$

式中, $x_y(y, z)$ 和 $x_z(y, z)$ 分别为 x 对 y, z 的偏导数, 可由以下两式确定:

$$x_y = -\frac{a \cdot y}{b \cdot \sqrt{b^2 - y^2 - z^2}} \quad (5)$$

$$x_z = -\frac{a \cdot z}{b \cdot \sqrt{b^2 - y^2 - z^2}} \quad (6)$$

将式(5)、(6)代入式(4), 并引入极坐标 $x = r \cos \theta, y = r \sin \theta$ 可得:

$$S = 2 \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^b \sqrt{\frac{b^4 + (a^2 - b^2)r^2}{b^2(b^2 - r^2)}} r dr \quad (7)$$

上式积分可借助 Mathematica 计算机代数系统^[8]求出, 略去具体的运算步骤, 可得:

$$S = b^2 \pi \left[2 + \frac{1}{e \sqrt{1 - e^2}} \left\{ \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{1 - 2e^2}{2e \sqrt{1 - e^2}} \right\} \right] \quad (8)$$

式中, $e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$ 。将椭球参数代入该式后可得潜

艇表面积 $S = 5.22457 \times 10^7 \text{cm}^2$ 。

潜艇在水下处于平衡状态, 其重力和所受浮力相等, 即潜艇质量与排水量相等, 则有:

$$\sigma \cdot S = m \quad (9)$$

将 S 代入后可得面密度:

$$\sigma = 306.245 \text{g/cm}^2 \quad (10)$$

2.2.2 潜艇外壳质量引起的重力垂直梯度计算公式

如图1所示, 以椭球中心为坐标原点建立空间直角坐标系, 取垂直向上为 Z 轴正方向, 按右手法则规定, 指向艇首的方向为 X 轴正向, 左舷方向为 Y 轴正向。设椭球上一面元为 dS , 则在空间一点 (X, Y, Z) 由该面元引起的引力位 W 为:

$$W = G\sigma \iint \frac{dS}{r} \quad (11)$$

式中, $r = \sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2 + (z-Z)^2}$, (x, y, z) 为面元 dS 的坐标。

式(11)对 Z 求二阶导数, 可得 (X, Y, Z) 处的重力垂直梯度为:

$$W_{zz} = G\sigma \iint \frac{3 \frac{(Z-z)^2 - r^2}{r^5} dS}{\sqrt{1 + x_y^2(y, z) + x_z^2(y, z)}} dydz \quad (12)$$

将式(5)、(6)代入式(12), 略去具体的运算步骤, 最终可得:

$$W_{zz} = G\sigma \iint_{D_z} \frac{\sqrt{a^2 b^2 - t^2 (a^2 + b^2)}}{tb} \left[\frac{-(Y-y)^2 + 2(Z-z)^2 - (X - \frac{a}{b}t)^2}{\left((Y-y)^2 + (Z-z)^2 - (X - \frac{a}{b}t)^2 \right)^{5/2}} - \frac{-(Y-y)^2 + 2(Z-z)^2 - (X + \frac{a}{b}t)^2}{\left((Y-y)^2 + (Z-z)^2 - (X + \frac{a}{b}t)^2 \right)^{5/2}} \right] dydz \quad (13)$$

式中, $t = \sqrt{b^2 - y^2 - z^2}$ 。

2.2.3 潜艇内部海水质量亏损引起的重力垂直梯度计算公式

此时计算区域为椭球内部, 设椭球内部一体元为 $dV = dx dy dz$, 则在空间一点 (X, Y, Z) 处由该体元引起的引力位 U 为:

$$U = -G\rho \iiint \frac{dx dy dz}{r} \quad (14)$$

式中, $\rho = 1.03 \text{g/cm}^3$ 为海水密度, 负号表示此处为海水质量亏损。对 Z 求二阶导数, 可得 (X, Y, Z) 处的重力垂直梯度为:

$$U_z = - G\rho \iiint \frac{3(Z-z)^2-r^2}{r^5} dx dy dz \quad (15)$$

实际计算时,可先将式(15)变换为以下三重定积分:

$$U_z = - G\rho \int_{-b}^b dz \int_{-\sqrt{b^2-z^2}}^{\sqrt{b^2-z^2}} dy \int_{-\frac{a}{b^2}}^{\frac{a}{b^2}} \frac{3(Z-z)^2-r^2}{r^5} dx \quad (16)$$

在 Mathematica 计算机代数系统中计算出对 x 的定积分,得到关于变量 y,z 的二重积分。

2.3 潜艇产生的总的重力垂直梯度

潜艇产生的总的重力垂直梯度 V_z 包括分布在潜艇外壳上的质量产生的重力垂直梯度 W_z 和内部海水质量亏损产生的重力垂直梯度 U_z , 即: $V_z = W_z + U_z$ 。 V_z 、 U_z 的积分区域均为圆域: $y^2 + z^2 \leq b^2$, 此时可引入极坐标 $y = r \cos \theta, z = r \sin \theta$, 积分范围相应变为 $0 \leq r \leq b, 0 \leq \theta \leq 2\pi$ 。 给定计算点 (X, Y, Z) 后, 在 Mathematica 计算机代数系统中使用数值积分命令 NIntegrate, 即可计算出潜艇在该处产生的总的重力垂直梯度。

对 X, Y, Z 方向产生的总重力垂直梯度进行计算, 并将其变化趋势绘制成图, 如图 2 ~ 10, 不同位置处的重力垂直梯度数值列于表 1 ~ 3 中。 以下各图纵轴为相应点处的总的重力垂直梯度 V_z , 以超导重力梯度仪有望达到的精度 $10^{-6}E$ 为单位。

(1) $Z = 100m$ 时 X 方向的变化情况 ($-1000m \leq X \leq 1000m$)

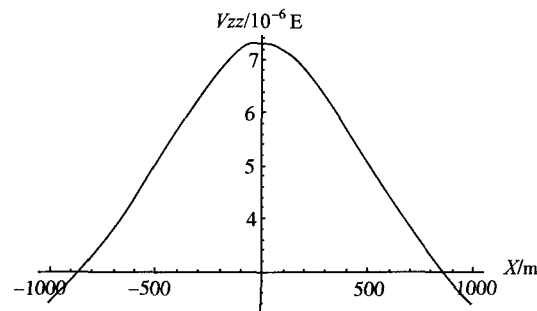


图2 Y=1000m 时 X 方向 V_z 的变化情况

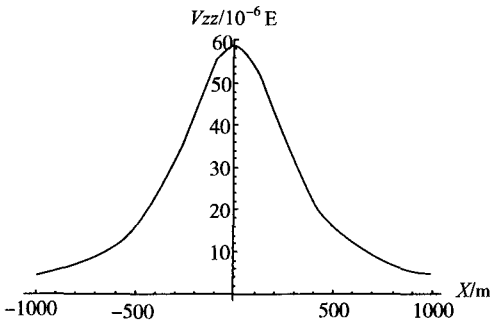


图3 Y=500m 时 X 方向 V_z 的变化情况

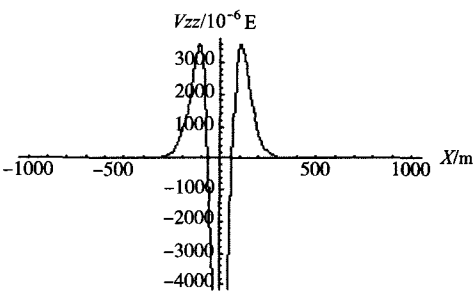


图4 Y=100m 时, X 方向 V_z 的变化情况

表1 Y=1000m、500m、100m 时不同 X 处的重力垂直梯度 单位: $10^{-6}E$

Y \ X						
	-1000	-800	-600	-400	-200	0
1000	2.38	3.23	4.34	5.65	6.83	7.32
500	4.26	6.79	11.59	21.87	42.54	58.58
100	5.22	8.41	12.80	12.17	774.71	-9274.44
Y \ X						
	200	400	600	800	1000	
1000	6.83	5.65	4.34	3.23	2.38	
500	42.54	21.87	11.59	6.79	4.27	
100	774.71	12.17	12.80	8.41	5.22	

(2) $Z = 100m$ 时 Y 方向的变化情况 ($-1000m \leq Y \leq 1000m$)

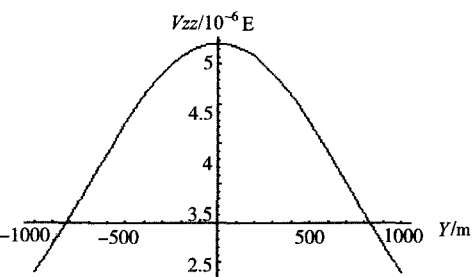


图5 X=1000m 时 Y 方向 V_z 的变化情况

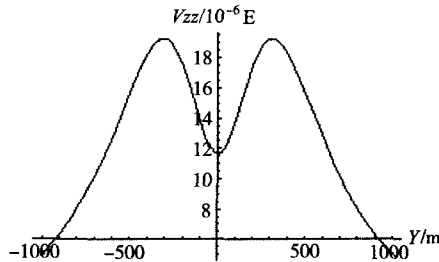


图6 X=500m 时 Y 方向 V_z 的变化情况

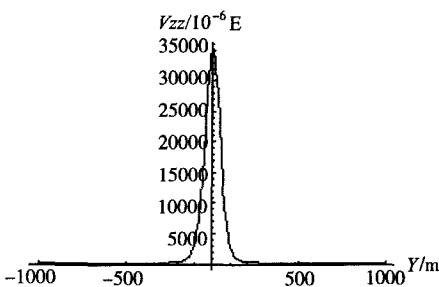


图7 X=100m 时 Y 方向 V_z 的变化情况

表 2

X=1000m、500m、100m 时

不同 Y 处的重力垂直梯度

单位:10⁻⁶E

X Y	-1000	-800	-600	-400	-200	0
1000	2.38	3.09	3.88	4.61	5.10	5.26
500	4.99	7.98	12.78	18.28	17.48	11.66
100	7.19	13.94	32.21	96.73	380.99	35288.87
X Y	200	400	600	800	1000	
1000	5.10	4.61	3.88	3.09	2.38	
500	17.48	18.28	12.78	7.98	4.99	
100	380.99	96.73	32.21	13.94	7.19	

(3) Z 方向的变化情况 (10m≤Z≤300m)

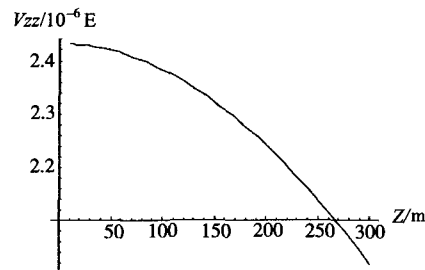


图 8 X=1000m,Y=1000m 时,Z 方向 V_{zz} 的变化情况

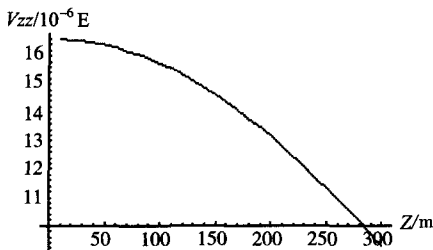


图 9 X=500m,Y=500m 时,Z 方向 V_{zz} 的变化情况

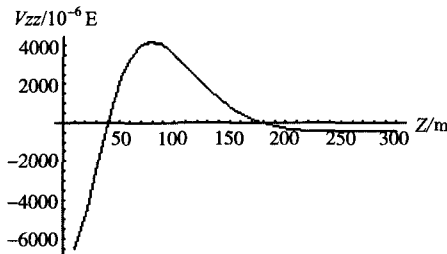


图 10 X=100m,Y=100m,Z 方向 V_{zz} 的变化情况

表 3

X、Y 一定时不同 Z 处的

重力垂直梯度

单位:10⁻⁶E

X、Y Z	30	60	90	120	150
(1000,1000)	2.43	2.41	2.39	2.36	2.32
(500,500)	16.50	16.27	15.87	15.32	14.62
(100,100)	-2531.31	3211.85	3934.62	2292.97	795.86
X、Y Z	180	210	240	270	300
(1000,1000)	2.27	2.22	2.16	2.09	2.02
(500,500)	13.77	12.80	11.71	10.53	9.29
(100,100)	-31.33	-376.75	-471.52	-457.15	-403.91

分析图 2~10,并结合表 1~3,可以得出以下结论:

(1) 当下潜深度为 100m 时,它在海面上-1000m≤X≤1000m、-1000m≤Y≤1000m 范围内产生的重力垂直梯度在 (X=1 000m,Y=1 000m) 处最小为 2.38×10⁻⁶E,在 (X=0m,Y=100m) 处为-9.27×10⁻³E,在 (X=100m,Y=0m) 处为3.5288×10⁻²E。因此,如果现有的重力梯度仪精度为 10⁻⁴E,在海面上 100m 范围内能够探测到该艇;当重力仪的精度达到或超过 10⁻⁶E 时,探测范围将可扩大到 1000m。

(2) 当下潜深度达 300m 时,它在 (X=100m,Y=100m) 处产生的重力垂直梯度为-4.04×10⁻⁴E;在 (X=1 000m,Y=1 000m) 处最小为 2.02×10⁻⁶E。因此,即使该艇下潜深度为 300m,如果现有的重力梯度仪精度为 10⁻⁴E,在海面上 100m 范围内仍然能够探测该艇;当重力仪的精度达到或超过 10⁻⁶E 时,探测范围将可扩大到 1000m。在海面上-500m≤X≤500m、-500m≤Y≤500m 以外的区域,潜艇产生的重力垂直梯度随潜艇下潜深度的增大而减小,但减小的幅度较小,这将有利于远距离探潜的实现。

3 结束语

本文提出了通过测量重力梯度探测潜艇的新方法,建立了模拟艇的数学模型,推导出了该艇产生的重力垂直梯度计算公式,借助 Mathematica 代数系统计算了坐标轴各方向的重力垂直梯度,分析了其变化趋势,结果表明如果现有的重力梯度仪精度为 10⁻⁴E,即使下潜深度达 300m,在海面上 100m 范围内能够探测到该艇;当重力梯度仪的精度达到或超过 10⁻⁶E 时,可在海面上1000m 范围内实现探测。随着未来高精度重力梯度仪的研制成功,该技术将会有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 马治国,王江安. 一种新的激光探潜方法[J]. 海军工程大学学报,2002,14(6):77~83.

[2] 崔国恒,于德新. 非声探潜技术现状及其对抗措施[J]. 火力与指挥控制,2007,32(12):10~13.

[3] 韩 晶,赵朝方. 海洋遥感技术在探测潜艇中的应用[J]. 装备环境工程,2008,5(3):67~70.

[4] 张赤军,边少锋,周旭华,等. 重力垂直梯度的测定及其应用与潜力[J]. 地球物理学进展,2007,22(2):1686~1691.

[5] 张赤军,边少锋. 地面扰动重力垂直梯度的确定[J]. 地球物理学进展,2005,20(4):969~973.

参考文献:

- [1] 陈宗镛. 潮汐学[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [2] Huang N E, Shen Z, Long SR. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proc of the Royal Society of London, 1998, A(454): 903 ~ 995.
- [3] 刘慧婷. EMD 方法的研究与应用[D]. 合肥: 安徽大学, 2006.

- [4] 熊学军,郭炳火,胡筱敏,等. EMD 方法和 Hilbert 谱分析法的应用与探讨[J]. 黄渤海海洋,2002,20(2): 12~21.
- [5] 胡维平,莫家玲,龚英姬,等. 经验模态分解中多种边界处理方法的比较研究[J]. 海洋学报,2007,29(6): 1395~1398.
- [6] 尹逊福,徐龙,熊学军,等. 南海东部区域的海流状况—海流的经验模分解和 Hilbert 谱[J]. 海洋科学进展,2003,21(2):148~159.

Application of Empirical Mode Decomposition Method in Decomposing Tidal Current and Residual Current

WANG Guo-long^{1,2}, WU Zhong-ding², YUAN Yan-mao², WANG Yang²

(1. Institute of Meteorology, Science and Technology University, Nanjing, Jiangsu, 211101;

2. Naval Institute of Hydrographic Surveying and Charting, Tianjin, 300061)

Abstract: This paper analysed the basic principle of Empirical Mode Decomposition (EMD) method in non-stable signal processing, completed the separation of the actual current data, and tested the validity of using EMD to decompose tidal current and residual current in different situations of 720 hours, 25 hours, and 15 hours. The comparison showed that EMD method was effective for separating tidal and residual current, Especially the short-term current data within 15 hours.

Key words: EMD; harmonic analysis; residual current

(上接第 27 页)

- [6] Gary W. Coburn, Jeff Schneider. Using Gravity Gradiometry in Seismic Interpretation in Pre-SDM [J]. World Oil, 2002, (1): 69~72.
- [7] 宁津生. 卫星重力探测技术与地球重力场研究[J]. 大

- [8] 边少锋,许江宁.计算机代数系统与大地测量数学分析[M].北京:国防工业出版社,2004.

Study on the Submarine Detection Method Based on the Gravity Gradient

SUN Lan¹, LI Hou-pu², BIAN Shao-feng², LI Hong-wu³, ZHOU Chao-ye³

(1. Department of Hydrography and Cartography, Dalian Naval Academy, Dalian, Liaoning, 116018;

2. Department of Navigation, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei, 430033; 3. 92678 Troops, Tianjin, 300060)

Abstract: A new method for detecting submarine based on the gravity gradient is put forward. The gravity vertical gradient of the submarine is calculated at different places with the help of computer algebra system Mathematica, and its characteristic is also analyzed. The results show that if the precision of existing gravity gradiometers is 10^{-4}E , the submarine could be detected within the range of 100m on the sea surface although it is 300m underwater, and the detection range will be enlarged to 1000m when the precision of gravity gradiometers is accurate up to 10^{-6}E .

Key words: gravity gradient; gravity vertical gradient; gravity gradiometer; computer algebra system