

基于地磁匹配的水下定位和定向方法研究

王胜平,陈晓勇,肖根如,王建强,徐效波

(东华理工大学,江西 南昌 330013)

摘要:借助地磁背景场及地磁测量,通过对相关分析中各指标的研究,给出了用于水下地磁匹配定位的最优指标。分析了现有 TERCOM 算法的缺陷并对其进行改进,提高了水下地磁匹配定位的精度;提出了基于两段序列匹配后的重心位置计算 INS 前期积累误差的算法,实现了对 INS 的准确修正,确保了载体的定向精度。试验验证了这些方法的正确性。

关键词:水下地磁匹配导航;相关分析;积累长度;INS 修正

中图分类号:P228.4

文献标识码:B

水下载体(如 AUV,ROV)导航一直是导航界关注的问题。水下导航多采用声学导航技术和惯性导航系统 INS(Inertial Navigation System)。前者因需要较庞大的声学阵列作为支撑,同时又易暴露,一般不被采用;后者虽是一种传统的、自主和无源导航系统,但长时间存在误差积累,需要不断的对其进行校正,才能保证导航精度。近年来,随着相关技术的发展,基于地形背景场的地形匹配技术得到了很大的发展,尤其是在军事领域^[1,2]。地形匹配多应用于陆地,通过寻找特征匹配地物,实现导航定位^[3]。海洋床底地形地貌相对平坦,特征地物的分布远不及陆地频繁,尤其是大洋床底。因此,基于地形匹配的水下自主导航方法很难获得较好的效果。相对地形,地磁是地球的固有属性,随位置而变化^[4],适合于自主导航。基于此,下面研究基于相关分析的水下地磁匹配方法,并验证这种方法的可行性。

1 水下地磁匹配导航基本理论

匹配导航的基本思想是以背景场为参考,利用实测数据并在背景场中寻找与之对应的匹配数据实现导航。这种导航可以是连续的,也可以是间歇性的。据此,水下地磁匹配首先需要选择地磁场模型作为背景场,利用实测地磁数据序列,在背景场形成的格网中寻找与之对应的序列,并从背景场中获取

相应的位置以实现基于地磁的水下导航(图1)。

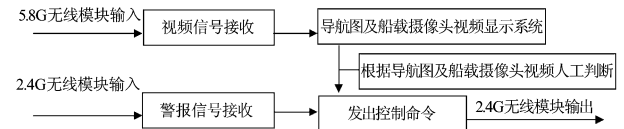


图1 水下地磁匹配导航原理示意图

地磁导航中用观测序列在背景场中寻找与之对应的匹配序列显得非常关键。由于背景场范围较大,而观测序列只是其中很短的一部分,在这么大的区域内寻找与之对应的匹配序列的速度直接关系到导航定位的速度。借助 INS 提供的信息可缩小搜索范围,提供匹配速度。INS 可以提供方位 A , 结合航程 S , 可以得到每个采样点的推算位置 (x_i, y_i) 。

$$x_i = x_0 + S \cos A \quad y_i = y_0 + S \sin A \quad S = v \Delta t \quad (1)$$

式中: (x_0, y_0) 为初始位置, v 为船速, Δt 为相邻测点间的耗时。

由于 INS 存在积累误差,根据 INS 指标和航行时间,对前期积累误差可以进行估计。积累误差不但会引起匹配段的初始位置偏差,而且还会影响到匹配期间的位置推算,因此,可以认为航迹的实际点位应该在 INS 推算航迹一定范围内。

2 改进的水下地磁匹配导航算法

尽管利用 INS 推算位置缩小了匹配导航的搜索

收稿日期:2013-07-10;修订日期:2013-07-15;编辑:孟舞平

基金项目:国家自然科学基金(41206078)

作者简介:王胜平(1983—),男,山西新绛人,讲师,主要从事海洋测绘相关方面研究工作;E-mail:shpwang@ecip.cn。

范围,但这个范围仍比较大。为了缩短搜索时间,提高匹配定位精度,研究匹配导航的算法。

在搜索范围内寻找与地磁实测序列对应的匹配序列采用的方法是 TERCOM(Terrain Contour Matching) 算法,即给出平行于 INS 推算航迹的一组序列作为最终匹配序列^[1-3]。该算法首先在格网内改变第一个 INS 推算点位置,寻找一组与 INS 推算航迹平行的一组新的序列。遍历第一个 INS 推算位置有效范围内的格网,得到多组与 INS 推算航迹平行的序列。将每一组序列各点格网对应的地磁值与磁力实测值进行匹配,寻找匹配最优的一组作为最终的匹配结果。

最优匹配组的判断采用图像处理中的相关分析算法,如互相关 COR(Cross Correlation) 算法、平均绝对差 MAD(Mean Absolute Difference) 以及均方差 MSD(Mean Square Difference) 算法。

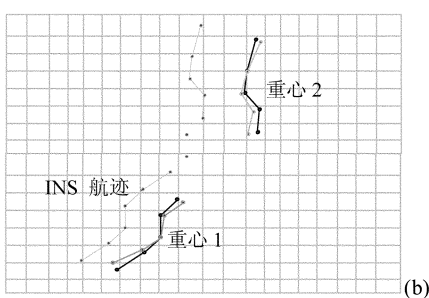
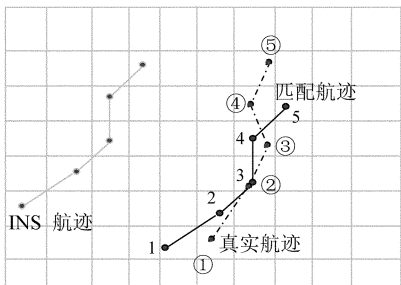


图 2 改进的地磁匹配导航思想

基于平行于 INS 推算航迹线寻找匹配序列的方法,其最优匹配结果如图 2(a) 所示。从图 2(a) 可以看出,尽管实现了匹配航迹与真实航迹上地磁序列的最大相关,但因匹配航迹平行于 INS 推算航迹,与真实航迹相交而非重合。只有在交叉点附件点的匹配精度最好,而其他位置均存在一定的偏差,尤其随着匹配序列长度的增加,在匹配航迹的首尾点偏差更大。尽管交叉点处精度最高,但因依靠地磁值进行匹配,因此很难获得交叉点的准确位置。此外,依靠上述方法,因为航迹点间距离较短,定位误差较大,无法精确计算航向,实现对 INS 的修正,不利于后续导航。为此,对上述方法进行改进。

首先,设定 2 个匹配段,对每个匹配段基于相关性分析法进行匹配(如图 2(b) 所示)。

其次,确定每个匹配段匹配航迹的重心坐标 (x_g, y_g) 。

$$\text{COR}(\tau_x, \tau_y) = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} T_{ACQ}(x, y) \times T_{ST}(x + \tau_x, y + \tau_y) dx \quad (2)$$

$$\text{MAD}(\tau_x, \tau_y) = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} |T_{ACQ}(x, y) - T_{ST}(x + \tau_x, y + \tau_y)| dx \quad (3)$$

$$\text{MSD}(\tau_x, \tau_y) = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} [T_{ACQ}(x, y) - T_{ST}(x + \tau_x, y + \tau_y)]^2 dx \quad (4)$$

式中: τ_x, τ_y 分别代表 2 个坐标轴方向的偏移量; T_{ACQ} 代表实测磁力值; T_{ST} 为对应位置的背景地磁值; L 为匹配序列的长度,即积累长度。

COR, MAD 和 MSD 算法机理表明,当 2 个序列具有较高的相关性,每点对应的磁力值接近,则 COR 达到最大, MAD 和 MSD 达到最小。

$$x = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^N w_i x_i, \quad y = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^N w_i y_i \quad (5)$$

$$W = \sum_{i=1}^N w_i, \quad w_i = 1/(T_{ST} - T_{ACQ})$$

式中: (x_i, y_i) 为匹配航迹上的点位; w 为其权值。

得到 2 个匹配段各自的重心 (x^1, y^1) 和 (x^2, y^2) 后,计算两重心连线的方位 A_0 。

$$A_0 = \arctg \frac{\Delta y}{\Delta x} = \arctg \frac{y^2 - y^1}{x^2 - x^1} \quad (6)$$

类似的,可以计算两个 INS 推算航迹段的重心,及其方位 A_{INS} 。

如果没有前期积累误差 ΔA ,理论上 A_0 应该等于 A_{INS} 。但因为 ΔA 的存在,二者存在偏差,该偏差即由于 INS 的积累误差产生的。因此,根据 A_0 和 A_{INS} 可计算 ΔA ,并实现对 INS 修正。

$$\Delta A = A_{INS} - A_0 \quad (7)$$

改进后的方法削弱了 TERCOM 引起的匹配航

迹与真实航迹不吻合问题的影响以及弥补了无法准确确定 INS 修正量的缺陷。基于两组匹配序列的重心确定航向,增大了距离,削弱了重心位置误差的影响,提高了方位的确定精度。

3 关键技术研究

3.1 最优匹配算法的确定

由式(2~4)可知,当 MAD, MSD 达到最小或者

表 1 三种相关分析指标在不同随机噪声下的匹配结果

指标	噪声 0/nT			噪声 5/nT			噪声 10/nT			噪声 20/nT		
	dx	dy	ds	dx	dy	ds	dx	dy	ds	dx	dy	ds
COR	34	56	66	53	145	154	67	325	332	67	325	332
MAD	16	46	49	16	68	70	88	76	116	196	202	281
MSD	1	58	58	1	76	76	70	40	81	160	148	218

由表 1 可以看出, COR 在噪声为 5 nT 时其匹配结果已经不准确, MAD 与 MSD 在噪声达到 20 nT 后匹配结果开始不准确。同类条件下, COR 的稳定性和精度均最差,可认为不适合作为匹配结果的决定性指标。MAD 和 MSD 两指标接近,均优于 COR 指标。但从二者的模型来分析, MSD 是 MAD 的平方,表 1 中实际上是将 MAD 放大后的指标,因此,可以认为 MSD 更能够反映匹配的精度。因此,在实际应用中,采用 MSD 指标。

3.2 积累长度 L 的确定

积累长度 L 是每次修正运动载体所需要的实测地磁数据序列长度。足够长的 L 可保证匹配的可靠性,但序列过长一方面会引起 INS 积累误差的增加,另一方面会增加搜索的时间,使匹配产生较大的延迟,非常不利于实时修正。因此,积累长度要选择的合适。

地磁背景场内的地磁数据是相关的,这种相关性对地磁匹配的性能有影响,相关性强的区域内,邻近的地磁较为相似,需要较长的积累长度 L;相关性差,局部特征独立且明显,较短的 L 即可实现匹配。格网化区域,在该区域存在 N 列,则地磁测量序列的相关长度 r_k 可公式(8)确定。

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{N-K} (T_i - \bar{m}_0)(T_{i+k} - \bar{m}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N-K} (T_i - \bar{m}_0)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N-K} (T_{i+k} - \bar{m}_k)^2}}$$

COR 达到最大时,即认为两序列匹配。为了得到一个最能反映匹配序列与真实序列最大相似的匹配算法,选定一个地磁背景场,对实测数据分别附加不同的噪声,实施匹配定位试验。实验中,INS 与初始真实位置的偏差设定为 350 m,积累误差设置为 20°。将最终匹配定位结果与真实位置进行比较,匹配定位在 x,y 方向和距离偏差 ds 见表 1。

$$\bar{m}_0 = \frac{1}{N-K} \sum_{i=1}^{N-K} T_i$$

$$\bar{m} = \frac{1}{N-K} \sum_{i=1}^{N-K} T_{i+k}$$

, $0 \geq k \geq N$ (8)

当自相关系数 r_k 等于 $1/e$ ($e = 2.71828$) 时,自相关长度 D 即等于 K 所对应的长度。利用积累长度 L 和 D 的比值,确定合适的积累长度。

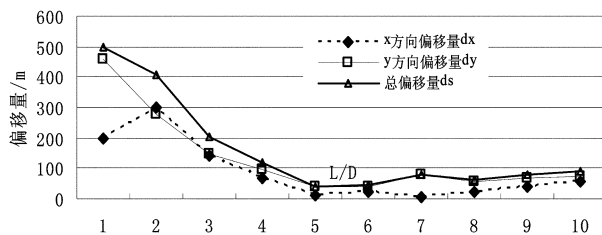


图 3 积累长度的确定

由图 3 可以看出,当 L/D 小于 4 时,实测地磁序列较短,加之在测区范围内相似序列不唯一,造成匹配结果的不准确。当 L/D 大于 4 之后,匹配结果得到很大改善,但同时也会引起搜索范围过大,匹配速度过慢问题。因此, L/D 选择 4 ~ 6 为宜。

3.3 地磁背景场对匹配的影响

地磁背景场是水下地磁导航的参考场,其精度和分辨率直接影响着最终导航定位的精度。地磁背景场多根据一定比例尺的实测数据经过处理获得,或者根据这些数据构建地磁场模型获得。背景场数据的精度越高,匹配采用的参考越准确,匹配精度越

高;从上述匹配过程可以看出,匹配的最终精度依靠偏离实际点的格网数来计算。分辨率高,格网描述的地磁变化特征细腻,匹配就可以得到较高精度的结果,但这也增加了搜索时间。为此,在实际应用中,根据匹配精度要求,可选择合适分辨率的地磁数据作为背景场。

4 试验及分析

为了验证该文所述方法的正确性。2011 年 8 月底在渤海湾某海域进行了 5 km × 5 km 的磁力测量,测量比例尺为 1 : 1 万,测线间隔为 100 m,测点间隔为 10 m。对地磁数据进行了严格处理后,利用多面函数构建了该区域的地磁场模型。基于该模型,获得了区域格网,格网分辨率为 20 m × 20 m。在该背景场中,沿着不同方向选定 5 组数据,每组数据分为 2 段,每段序列长度根据式(8)和 L/D > 4 原则确定为 5。在背景场中直接选定的地磁数据作为真实航迹数据(观测数据)。以真实航迹数据为参考,模拟惯导航迹。设定 INS 初始积累误差 ΔA 为 15°,误差累计速率为误差累计为 0.001°/h,前期积累误差造成的每段起点的偏差为(350 m,350 m)。根据 ΔA 以及真实航迹计算所得每段的距离和方位 A₀,获得 INS 方位 A。

$$A_{INS} = A_0 + \Delta A \quad (9)$$

结合式(1),推算 INS 航迹点的位置,并结合 INS 前期积累误差,锁定搜索范围。

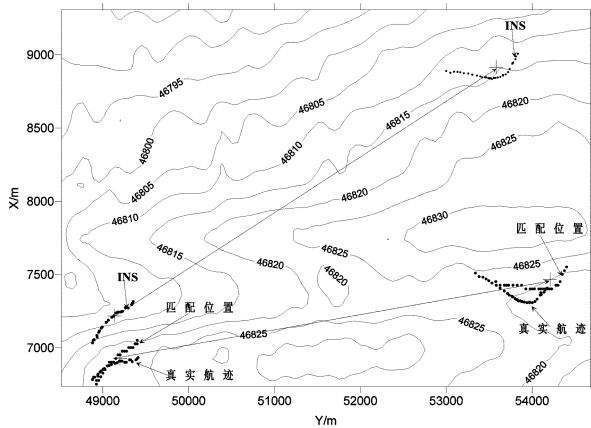


图 4 组 1 在试验区的地磁匹配导航

基于上述实测地磁数据及 INS 推算航迹,利用前面所述方法进行水下地磁匹配导航定位试验。图 4 是利用组 1 数据进行匹配定位的结果。由图 4 中可以看出,基于传统的 TERCOM 定位方法,得到了段 1

和段 2 的匹配航迹,匹配航迹同 INS 航迹的关系是平行关系,同实际航迹相交但不重合。比较匹配后点位置和真实位置,各点的匹配精度如图 5 所示。

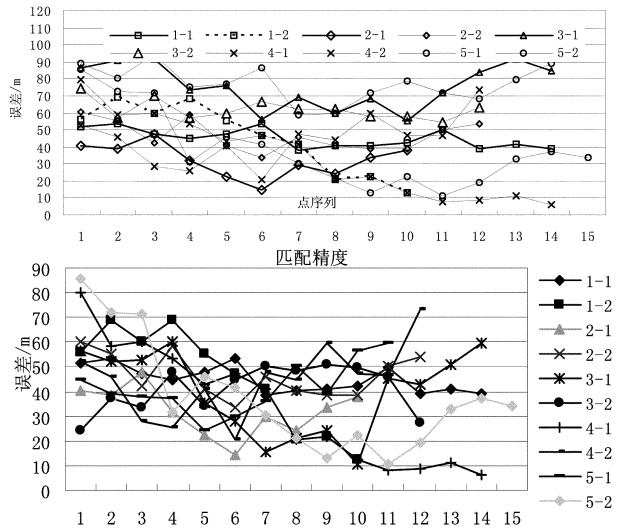


图 5 组 1 两段匹配导航定位精度

从图 5 可以看出,5 组不同段匹配点的误差分布于 8 ~ 86 m 之间。统计不同段匹配精度指标如表 2 所示。

表 2 不同组匹配定位和航向校正精度

项目	组 1	组 2	组 3	组 4	组 5	
段 1	dx_1 (m)	24	18	35	10	27
	dy_1 (m)	36	22	14	31	28
	ds (m)	45	32	40	34	41
段 2	dx_1 (m)	36	41	32	33	23
	dy_1 (m)	22	20	24	20	24
	ds (m)	45	46	39	44	35
段间距离	S (km)	5.9	3.4	3.1	3.9	2.2
计算所得积累误差 ΔA	ΔA (°)	14.53	15.52	15.18	14.62	15.24
ΔA 相对实际积累误差的偏差	dA (°)	-0.47	0.52	0.18	-0.38	0.24

统计结果表明,背景场内,匹配点位精度均优于 100 m,达到了预期目标。图 5 的误差分布进一步表明单一依靠某个段内测点的匹配位置,难以在较小的距离范围内实现高精度定向。为此,计算了每段匹配后航迹的重心位置,并利用两段所得重心计算了方位 A₀。类似的,也计算了每段 INS 推算航迹的重心位置以及由两重心确定的方位 A_{INS}。比较 A₀ 和 A_{INS},则二者差值 ΔA 如表 2 所示。比较 ΔA 与初始设定积累误差(15°),这种方法确定的航向修正偏差 dA 如表 2 所示。dA 统计结果表明,dA 的精度

优于 0.6° , 相对较高。

5 结论及建议

(1) 该文提出的基于地磁匹配实现水下导航的思想和算法在理论上是正确的, 相对传统的 TERCOM 方法, 有效的提高了定位精度, 弥补了传统方法无法准确实现积累误差修正的缺陷, 实现了基于地磁的水下高精度定位和定向。实践也表明了这点。

(2) 在地磁匹配导航中, INS 的积累误差要进行适当的控制, 过大的积累误差会给出较大的搜索范围, 并耗费较多的搜索时间, 因此建议根据 INS 的性能参数, 适时的实施匹配修正, 将 INS 积累误差控制在 10° 以内为宜。

(3) 测区地磁变化的相关性决定着积累长度 L ,

从而影响着定位精度和搜索时间, 还可能造成尽管 L 足够长但仍无法获得高精度匹配结果的问题(即误匹配)。为此, 需要选择合适的匹配路径, 以降低 L 长度并获得较高的匹配精度。此外, 需要深入研究误匹配的解决方案, 以提高算法的应用范围。

参考文献:

- [1] 刘承香. 水下潜器的地形匹配辅助定位技术研究[D]. 哈尔滨工程大学博士论文, 2003.
- [2] 刘准, 倡文芳, 陈哲. 海底地形匹配技术研究[J]. 系统仿真学报, 2004, (4): 700-702.
- [3] 陈绍顺, 李彦斌, 李云. 地形匹配制导技术研究[J]. 制导与引信, 2003, (9): 17-21.
- [4] 安振昌. 地磁场模型和冠谱分析[J]. 地球物理学进展, 1992, 7(3): 73-80.

Study on Precise Positioning and Orientation Based on Underwater Geomagnetic Match

WANG Shengping, CHEN Xiaoyong, XIAO Genru, WANG Jianqiang, XU Xiaobo

(East China Technology University, Jiangxi Nanchang 330013, China)

Abstract: Through geomagnetic background field, geomagnetic measurement, and correlation analysis, optimum method for underwater geomagnetic match navigation has been given. Disadvantages and shortcomings of current TERCOM calculation method have been analyzed, and improved the positioning accuracy of underwater geomagnetic matching. A calculation method has been put forward, that is to calculate early accumulation of errors INS algorithm based on the center of gravity position of two sequences. Thus, accurate fix to INS has been realized, and the accuracy of the orientation vector can be ensured. Experiments have verified the validity of these methods.

Key words: Underwater geomagnetic match navigation; correlation analysis; accumulation length; accumulation compensation of INS