

一种多波束测深声线跟踪自适应分层方法

张志伟¹ 暴景阳² 金 山³

(1. 91550 部队 辽宁 大连 116021; 2. 武汉大学 测绘学院 湖北 武汉 430079;

3. 91604 部队 山东 龙口 265700)

摘要: 为解决声线跟踪精度与计算量之间的矛盾,在常梯度分层声线跟踪法的基础上,提出了一种适用于多波束测深的声线跟踪自适应分层方法,即利用 Douglas-Peucker 算法对原始声速剖面数据进行筛选分层。给出了不同阈值的分层结果,并对等间隔分层与自适应分层的声线跟踪结果进行了比较。实验结果表明,自适应分层法能够顾及到声速结构变化规律,有效提取声速变化节点,克服了人工选点的不足;在相同计算量情况下,自适应分层法声线跟踪精度要优于传统的等间隔分层法。本方法能够有效解决声线跟踪精度与计算量之间的矛盾,具有良好的工程应用价值。

关键词: 多波束测深;声线跟踪;Douglas-Peucker 算法;等间隔分层;自适应分层;阈值

中图分类号: P229.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-3044(2018)01-0023-04

1 引 言

声速误差是影响多波束测深结果的主要因素。为提高多波束测深数据精度,必须对数据进行声速改正^[1-5]。声线跟踪法作为一种有效的声速改正方法,是建立在声速剖面基础上,通过沿波束传播路径逐层追踪声线计算波束脚印相对于船体坐标系的深度和水平位移^[6]。声线跟踪法严格依赖于声速剖面的分层,分层越密,声线跟踪精度越高,但同时造成计算量增加^[7]。

此外,声速剖面仪测得的声剖数据可在测深系统操作单元上直接输入、编辑和显示等。但在实时声线跟踪过程中,由于处理系统自身设置的局限性,有时需要对声速采样数目加以限制,使之满足处理系统的要求。如 EM950 多波束测深系统最多只能用到 100 个不同的声速剖面数据进行声速改正^[8]; SeaBeam2100 多波束测深系统最多只能接受 30 个声速数据^[9]。而现场实测的声速剖面往往采样间隔较小,获取声速数据较多,必须通过合理筛选才能使用,选取不同的声速数据进行声线弯曲改正会影响测深精度。EM950 多波束测深系统对声速剖面数据选点有如下规定^[10]:在水深 1~50m 时,以 1m 间隔选点;50~100m 时,以 10m 间隔选点;100~200m 时,以 25m 间隔选点;200~300m 时,以 50m 间

隔选点;300~2000m 时,以 100m 间隔选点。但该规定仅凭借经验粗略的进行分段划分,缺乏衡量分层充分性与合理性的判断依据。

针对上述问题,本文拟在常梯度分层声线跟踪法的基础上,提出一种适用于多波束测深声线跟踪的自适应分层方法,并通过理论计算和实验仿真对其性能进行分析讨论。

2 常梯度分层声线跟踪法

图 1 为常梯度声线跟踪算法原理示意图,假设水体共分为 N 层,声速在层间均按常梯度变化,第 i 层上下界面水深分别为 z_i 、 z_{i+1} ,上下界面声速分别为 C_i 、 C_{i+1} , θ_i 、 θ_{i+1} 分别为第 i 层初始入射角和末端入射角, Δx_i 为第 i 层波束的水平位移, g_i 为第 i 层中的声速梯度,声速在层内实际传播路径为曲率半径 R_i 的圆弧。

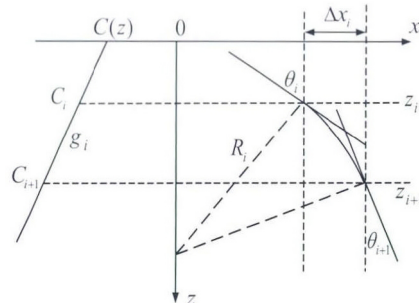


图 1 常梯度声线跟踪法示意图

收稿日期: 2016-07-01; 修回日期: 2016-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(41074002, 41576105); 国家安全重大基础研究(国防 973)。

作者简介: 张志伟(1987-),男,江苏连云港人,博士,主要从事海道测量数据处理理论与方法研究。

采用常梯度分层声线跟踪法时,通过推导可得波束在第 i 层内传播的水平位移及时间为:

$$\begin{cases} \Delta x_i = \frac{[1 - (pC_i)^2]^{1/2} - [1 - p(C_i + g_i \Delta z_i)^2]^{1/2}}{pg_i} \\ t_i = \frac{\arcsin[p(C_i + g_i \Delta z_i)] - \arcsin(pC_i)}{pg_i^2 \Delta z_i} \ln \left(1 + \frac{g_i \Delta z_i}{C_i} \right) \end{cases} \quad (1)$$

利用上述算法进行声线跟踪是建立在声速剖面的基础上,可采用层追加方式实现^[6,11],关于声速剖面的分层通常采用等间隔分层的方法,声线跟踪精度取决于声速剖面分层精细程度,分层越多,声线跟踪精度越高,但相应的计算量也随之增加。

3 自适应分层声线跟踪法

3.1 自适应分层原理

Douglas-Peucker 算法是一种具有代表性的矢量曲线简化算法,可称作“数学最优”,对原线要素视觉表示最好^[12]。其原理也可以用于声线跟踪过程中声速剖面采样数据的分层选取,具体过程如下:

利用声速剖面仪采集到的实测声速剖面数据往往是按等深度间隔分布,可将离散声速剖面数据表示为 $(veciloty(i), depth(i))$ $i=1, 2, \dots, N$, 首先选取声速剖面第一个点 $(veciloty(1), depth(1))$ 和最后一个点 $(veciloty(N), depth(N))$, 将两端点连成一直线, 计算声速剖面曲线上各离散声剖点 $(veciloty(i), depth(i))$ 到该直线的距离 D_i , 设定阈值为 δ , 若 $\{D_i\}_{\max} < \delta$, 则保留两端点, 舍去所有中间点; 若 $\{D_i\}_{\max} \geq \delta$, 则保留声速剖面中到直线距离最大的中间点, 并以该点为基准将声速剖面分为两部分, 再分别对这两部分数据重复上述过程, 直到没有点被舍去为止, 将最终结果作为声速剖面自适应分层的节点。

在阈值的选取方面, 阈值越小选取的点数越多, 声线跟踪精度越高, 但阈值不能选取过小, 否则将失去分层的意义。在阈值选取时, 应同时兼顾测深系统对输入声速数据的个数限制和测深精度限差的要求。由于原始声速剖面采样间隔与水深和声速剖面的变化范围之间具有一定关联性, 在上述方法中可将原始声速剖面采样间隔大小与声速剖面变化量的比值作为初始阈值 δ_0 , 对阈值按一定步长进行微调, 直至满足系统对声速数据输入个数及测深精度的要求。图2为自适应分层法的原理示意图。

上述分层方法按照声速结构分布规律自适应搜

索声速数据, 通过非等间距的划分方式, 有效控制了分层数量, 在声线跟踪过程中能够减少运算量, 且克服了人工选点主观性的不足。

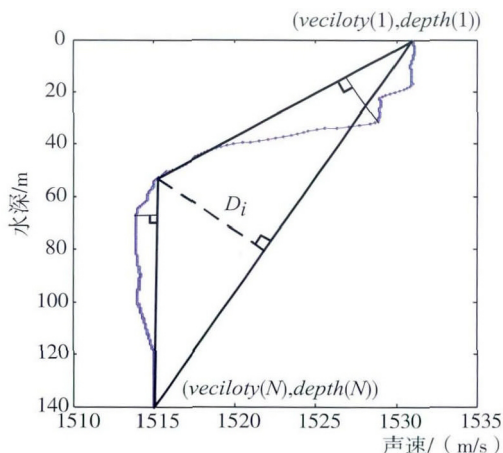


图2 自适应分层示意图

3.2 分层方法性能评估

为了研究原始声速剖面经自适应分层后对测深的影响以及评估本文自适应分层方法的有效性和可行性, 采用以下步骤对分层后的声速剖面与原始声速剖面声线跟踪结果进行比对。

(1) 基于给定的小采样间隔基准声速剖面数据以及预设水深值(可取实测声速剖面最大采样深度), 采用传统的常梯度分层声线跟踪算法计算每个波束对应的回波时间。

(2) 利用本文提出的自适应分层方法确定的声速剖面, 结合上述计算的回波时间, 采用常梯度声线跟踪法反算水深值, 对原始水深和反算的水深进行比对分析。

美国国家海洋与大气局(NOAA)在《海道测量规范与提交》中对声速剖面引起的水深误差进行了如下规定:“若已知声速剖面与实际声速剖面对测深改正造成的互差超过0.25%水深则视为超限”。定义有效波束比为未超限波束个数与总波束个数的比值^[15], 并以此来衡量判断声速剖面的有效性。

4 算例分析

4.1 实验数据选取

选取两个不同区域的实测声速剖面A、B, 见图3, 声速剖面A采样间隔为0.5m, 声速数据为281个, 声速剖面B采样间隔为0.2m, 声速数据为426个, 由于两组数据采样间隔较小, 获取的声速数据较为密集, 实际应用时应按照系统要求加以筛选, 通过分析发现声速剖面A、B均存在若干声速变化节点。为保证测量精度, 在声线分层跟踪计算时, 应顾及这些变化节点的声速信息。

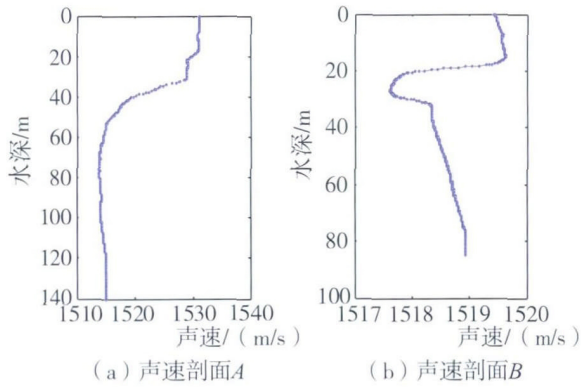


图 3 原始声速剖面示意图

4.2 不同阈值分层结果

采用本文介绍的方法通过选取不同阈值对声速剖面 A、B 进行自适应分层,结果见图 4、5。

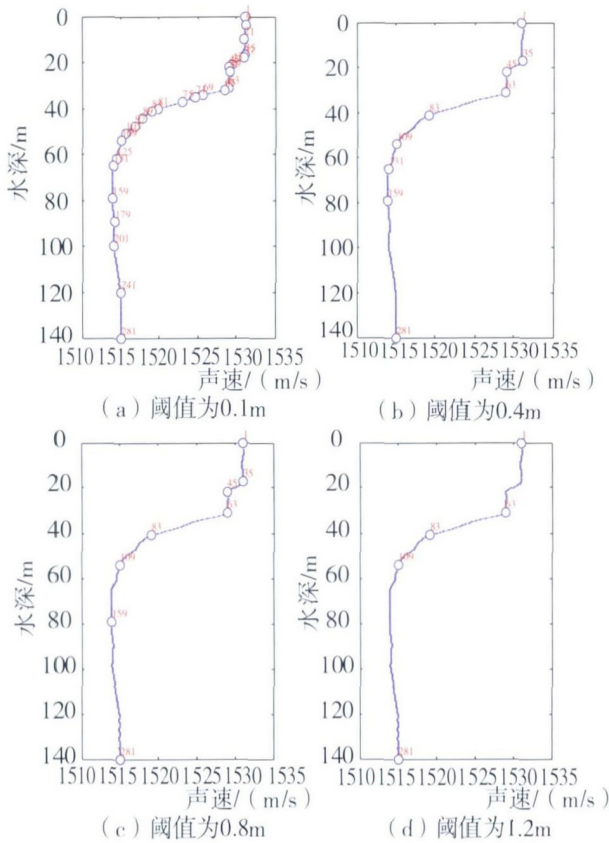


图 4 声速剖面 A 不同阈值分层结果示意图

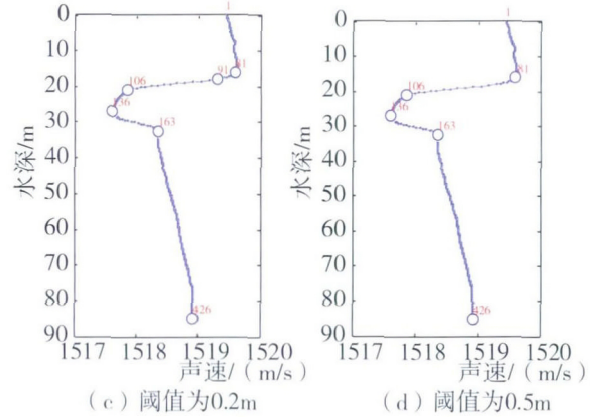
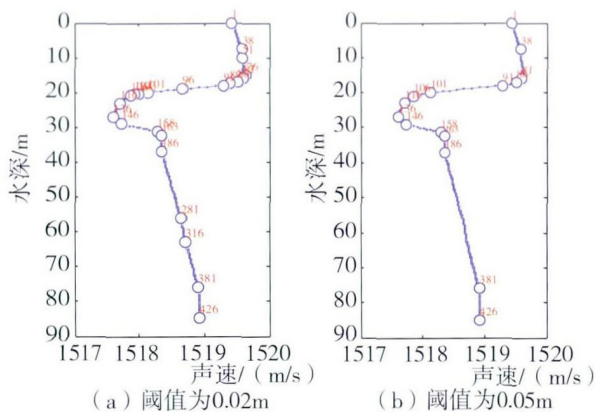


图 5 声速剖面 B 不同阈值分层结果示意图

从图 4、5 可以看出,上述自适应分层法能够顾及到声速结构变化规律,有效提取声速变化的节点,且随着阈值的增大,提取的声速数据量减少,即分层数目增加。由于声速剖面 A 中声速变化范围要大于声速剖面 B 中声速变化范围,所以声速剖面 A 分层时选择的阈值通常要大于声速剖面 B。

4.3 两种分层方法比较

以声速剖面 A 为例进行分析,假设平坦海底水深为 140m,以 1.5° 为间隔,仿真生成 101 个波束,扇面开角为 150° ,将利用自适应分层法确定的声速剖面进行声线跟踪的结果与原始声速剖面声线跟踪结果相比较。

在对声线跟踪结果进行分析前,首先对提取的各个声剖节点进行线性内插分析,发现内插后的声速剖面与原声速剖面相比偏差较小,说明上述方法选取的声速节点具有较强的代表性。

图 6 给出了不同阈值对应的分层数目变化情况,可见,随着阈值的增大,分层数目减小,当阈值大于 0.5m 时,分层数目变化较为平缓;当阈值小于 0.5m 时,分层数目变化较为剧烈。表 1 中给出了不同阈值范围声线跟踪结果,其中水深最大偏差表示仿真波束的最大偏差,即边缘波束偏差,当阈值小于 3.22m 即分层数目大于 4 层时,自适应分层后的声速剖面校正结果满足精度要求。

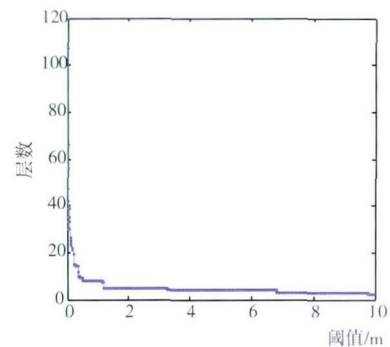


图 6 不同阈值对应的分层数目示意图

表1 不同阈值范围声线跟踪结果

阈值 (m)	层数	水深最大偏差 (m)	有效波束比 (%)
$\Delta d > 9.77$	1	3.962	72.28
$6.83 < \Delta d < 9.77$	2	1.002	88.12
$3.22 < \Delta d < 6.83$	3	0.551	94.1
$1.15 < \Delta d < 3.22$	4	0.233	100
$0.49 < \Delta d < 1.15$	5~7	0.219	100
$0.21 < \Delta d < 0.49$	8~14	0.019	100
$\Delta d < 0.21$	>14	0.003	100

为进一步说明自适应分层法的有效性,当分层数目相同时,对等间隔分层法和自适应分层法重构的声速剖面及声线跟踪结果进行比较,将结果列于表2、3,其中声速误差是利用重构的声速剖面与原始声速剖面计算的均方根误差。

表2 等间隔分层声线跟踪结果

分层间隔 (m)	层数	声速误差 (m/s)	水深最大偏差 (m)
2	70	0.0286	0.001
4	35	0.1146	0.012
8	17	0.1882	0.037
12	11	0.6485	0.079
16	8	0.6982	0.212
20	7	1.0324	0.309

表3 自适应分层声线跟踪结果

阈值 (m)	层数	声速误差 (m/s)	水深最大偏差 (m)
0.010	70	0.0021	0.000
0.060	35	0.0170	0.003
0.206	17	0.0543	0.000
0.360	11	0.1034	0.019
0.400	8	0.1639	0.019
0.500	7	0.1990	0.019

由表2、3可知,当分层数目相同时,采用等间隔分层造成的声速误差要大于采用自适应分层造成的声速误差,同时利用前者进行声线跟踪造成的水深偏差也要大于后者。这说明在相同计算量情况下,自适应分层法声线跟踪精度要优于传统的等间隔分层法;反之,在相同精度的前提下,自适应分层法由于分层数量小于等间隔分层法,所以计算量要小于后者。如前文所述,若以多波束系统规定参与计算的声速个数为依据,例如规定不超过30个声速数据,根据图5可以得到相应的阈值为不低于0.08m,进而可实现声速剖面的自适应分层,能够显著提高实时声线跟踪效率。

5 结束语

在声线跟踪过程中,声速剖面采样间隔越小,声线跟踪精度越高,但容易造成计算量增大,此外,由于部分多波束测深系统本身的缺陷,在实时声线跟踪过程中,有时需要对声速数据量加以限制。为了平衡计算精度与运算量之间的矛盾,满足部分多波束系统对声速数据量的输入要求,本文基于Douglas-Peucker算法提出一种自适应分层方法。该方法能够根据声速垂直方向的变化规律,对原始声速数据进行科学采点,一方面能够满足系统对声速数据量的要求,另一方面可减少运算量。在实际工程应用中,可较好地提高多波束测深系统的工作效率,同时保证了声线跟踪精度,为多波束测深数据采集质量的实时监控和实时声线跟踪提供一定的指导。

参考文献:

- [1] 李家彪,郑玉龙,王小波,等.多波束测深及影响精度的主要因素[J].海洋测绘,2001,21(1):26-32.
- [2] 周坚,周青,吕良,等.关于多波束声速剖面改正问题的探讨[J].海洋测绘,2014,34(4):62-65.
- [3] 孙文川,暴景阳,金绍华,等.多波束海底地形畸变校正与声速剖面反演[J].武汉大学学报:信息科学版,2016,41(3):349-355.
- [4] 刘胜旋,屈小娟,高佩兰,等.声速剖面对多波束测深影响的新认识[J].海洋测绘,2008,28(3):31-34.
- [5] 董庆亮,韩红旗,方兆宝,等.声速剖面改正对多波束测深的影响[J].海洋测绘,2007,27(2):56-58.
- [6] 赵建虎,刘经南.多波束测深及图像数据处理[M].武汉:武汉大学出版社,2008.
- [7] 张居成,郑翠娥,孙大军.用于声线跟踪定位的自适应分层方法[J].哈尔滨工程大学学报,2013,34(12):1497-1501.
- [8] 刘胜旋.EM950多波束测深系统及其相关设备的简介[J].海洋地质,2000(2):1-8.
- [9] 何高文.多波束测深系统声速校正[J].海洋技术,2000,19(4):14-21.
- [10] Simrad.Operator Manual Kongsberg Simrad EM950 Multibeam Echo Sounder[S].1998.
- [11] 魏玉阔.多波束测深假象消除与动态空间归位技术[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.
- [12] McMaster R B.A Statistical Analysis of Mathematical Measures of Linear Simplification[J].The American Cartographer,1986,2(13):103-116.
- [13] 朱小辰.多波束测深数据处理关键模型及应用研究[D].大连:海军大连舰艇学院,2011.

(下转第42页)

