



航海图等深线化简质量的定量评估指标与方法

张立华^{1,2} 温连发^{1,2} 贾帅东^{1,2}

1 海军大连舰艇学院海洋测绘系,辽宁 大连,116018

2 海洋测绘工程军队重点实验室,辽宁 大连,116018

摘要:针对当前对航海图等深线化简的质量评估仅能靠经验定性分析、无法进行定量评估这一局限,从航海安全性、航行资源表达和平滑性准则出发,分别定义了扩深长度、平均扩深距离、缩深面积、等深线的弯曲度与光滑离差等质量评估指标,提出了相应的评估方法,并推导出了相关的计算公式。实验结果表明,定义的指标能分别从航海安全性、航行资源表达和平滑性3个方面较为明确合理地反映航海图等深线化简的质量;所提评估方法能定量评估等深线化简的质量,克服了传统经验方法只能定性分析的不足。

关键词:等深线;化简;质量;定量评估

中图法分类号:P229; P284

文献标志码:A

航海图等深线绘制的质量直接影响到舰船航行安全、航行资源的利用和海底地貌的显示^[1]。等深线化简是航海图等深线绘制中一项非常重要的工作^[2-4],科学、合理地评估航海图等深线化简的质量,是保证舰船航行安全、提高航行资源利用效率和合理显示海底地貌的基础与保障。

长期以来,对航海图等深线化简质量的分析评估主要依赖于海图制图人员的主观判断和经验分析。等深线化简时,从航海安全性出发,主要采用“扩浅缩深”这一传统做法,以期望不误将浅水区划入深水区而留下安全隐患。在中小比例尺海图上,为了将可以航行的区域、航道尽可能地表示出来,也要求适当地选取深水区。另外,考虑到海底地貌变化平缓等情况,在精度可控范围内,等深线应尽可能地描绘成光滑曲线^[1-4]。这些传统方法,在手工作业时代为等深线化简工作的完成作出了重要贡献,但等深线质量评估主要靠经验感知、定性分析,难以进行准确、定量的评估。随着数字化制图技术的不断发展,Douglas-Peucker等一些经典算法被应用于等高线的化简,面积差、保留的转角度数等指标也被用来评估化简效果^[5-7]。针对航海图等深线自动化简的技术方法在不断地发展^[2,3,8-11],但对于如何评估等深线化简的质量,目前仍然在沿袭手工时代的经验做法,无量化评估的标准,这既与信息化海图制图的需求相差

甚远,也严重制约着等深线自动化简技术真正走向成熟及实用化。因此,建立航海图等深线化简质量的定量评估指标,提出相应的定量评估方法,具有理论与现实意义。本文将从传统的主观定性评估提升到客观定量评估的层次,定义等深线化简质量的定量评估指标,提出相应的定量评估方法,并验证其可行性。

1 航海图等深线化简质量的定量评估因子与方法

1.1 航海图等深线化简的原则基准

1.1.1 航海图等深线化简的基本准则

根据国内外相关文献和规定^[1-5],可将航海图等深线化简通常需要遵守的准则归纳为3个方面:一是航海安全性准则,即等深线化简过程中可将凹入浅水区的小弯曲拉直,使化简后的等深线向深水区扩展,但要保留甚至可以稍加扩大凸向深水区的小弯曲,以避免等深线化简中将原来的浅水区划入深水区,简称“扩浅缩深”;二是航行资源表达准则,即在等深线的化简过程中,不能过度地将等深线向深水区拓展,造成实际中大片的深水区在化简后变成浅水区,从而导致航行资源利用过低;三是平滑性准则,即化简后的等深线应尽可能平缓圆滑。

1.1.2 航海图等深线化简的比对基准

航海图等深线化简后,对其质量进行评估时,应该选定一个可用于比对的基准等深线,然后分析化简后的等深线与基准等深线之间的差异。基准等深线精度应越高越好,但受海图制图作业工序等方面的限制,实际作业中并不一定能将化简后的等深线与相应海区密度最大的原始观测数据直接绘出的精确的等深线进行比对。出于作业方便性的考虑,可以认为化简前比例尺相对较大的航海图等深线为等级高的等深线,化简后比例尺相对较小的航海图等深线为等级低的等深线,从而将化简前的等深线作为基准等深线,用于评估化简后的等深线的质量。

1.2 航海安全性的评估

1.2.1 航海安全性指标的定义

当等深线服务于航海时,满足安全性要求是首要前提^[1-4,8]。因此,本文将构建一系列指标,如化简后等深线的扩深长度百分比、平均扩深距离等来对此进行评估。

1) 扩深长度及其百分比

如图 1 所示,海区某等深线化简后,有一部分位于化简前等深线的浅水区,从而将原来的浅水区变为深水区,这不符合前面所述的等深线化简的航海安全性准则。本文将这种扩大了深水区而不符合航海安全性准则的等深线区段简称为扩深区段,将位于扩深区段的化简后得到的等深线长度简称为扩深长度。相反地,等深线化简后位于化简前等深线深水区的部分以及化简前后位置保持不变的部分则为符合等深线化简安全性准则的区段。本文将未扩大深水区而符合安全性准则的化简后区段简称为非扩深区段,将位于非扩深区段的等深线长度简称为非扩深长度。扩深长度百分比则是指化简后等深线的扩深长度占总长度(包括扩深长度与非扩深长度)的百分比。

2) 平均扩深距离

当然,仅靠扩深长度及其百分比来反映某条等深线化简的航海安全性仍存在较大的局限性,因为化简后等深线的扩深长度及其百分比只反映沿等深线方向扩深部分所占的比重,不能完全反映出扩深的程度。为了弥补这一不足,本文进一步定义扩深距离。扩深距离是等深线扩深区段上某点化简前后位置之间的二维距离。平均扩深距离是指化简后等深线的扩深区段上的二维点的扩深距离的平均值。为了简化计算,我们可以将扩深面积与扩深长度的比值作为扩深的平均位移距离的取值。其中,扩深面积是指由原来的浅水区

变为深水区的区域的面积。

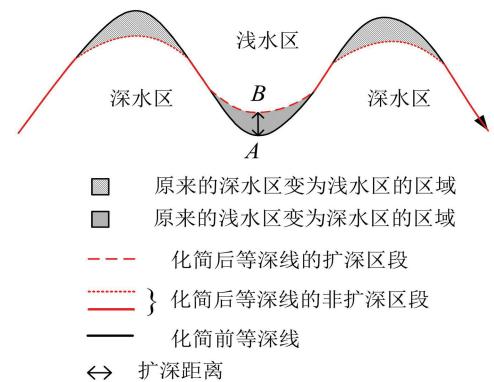


图 1 化简前后等深线示意图

Fig.1 Depth-Contour Before and After Simplification

1.2.2 安全性指标的评估方法

1) 扩深长度百分比的评估方法

根据前文扩深长度与非扩深长度的定义,可得到等深线的扩深长度百分比 ω 的计算式为:

$$\omega = \frac{l_s}{l} \times 100\% = \frac{\sum_{i=1}^m l_i}{\sum_{i=1}^n l_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中, l_s 表示化简后等深线的扩深长度; l 表示化简后等深线的总长度; l_i 表示某个扩深或非扩深区段的长度; m 表示化简后等深线扩深区段的总数; n 表示化简后等深线所有区段的总数。

2) 平均扩深距离的评估方法

根据平均扩深距离 \bar{d} 的定义及其简化计算方法,可得计算式为:

$$\bar{d} = \frac{A}{l} = \frac{\sum_{i=1}^m A_i}{\sum_{i=1}^m l_i} \quad (2)$$

式中, A 表示扩深面积; l 表示扩深长度; A_i 表示化简前后等深线所围的某个扩深区域的面积; m 表示化简前后等深线所围的扩深区域的总数; l_i 表示化简后等深线某个扩深区段的长度。

1.3 航行资源表达的评估

1.3.1 缩深面积百分比的定义

在遵守航海安全性准则的同时,化简后的等深线还要尽可能地将航海图上可利用的航行资源(区域)表达出来,即使得化简后等深线所示的深水区尽可能地接近化简前的深水区,尽可能地减小如图 1 中由原来的深水区变为浅水区的区域。本文将海图上等深线所围深水区面积的变化作为航行资源表达的评估指标,具体采用缩深面积百分比这一指标。缩深面积百分比指的是化简前等深线所围的深水区面积和化简后等深线所围的深水区面积(不包括由原来的浅水区变为深水区的

区域的面积)之差与化简前等深线所围的深水区面积的百分比。

1.3.2 缩深面积百分比的评估方法

根据缩深面积百分比 η 的定义,可得:

$$\eta = \frac{A' - A}{A'} \times 100\% \quad (3)$$

式中, A 表示化简后等深线所围的深水区面积; A' 表示化简前等深线所围的深水区面积。

实际中,还需注意非闭合等深线与闭合等深线所围深水区面积计算方法的差异,具体处理可参考文献[11]。

1.4 等深线平滑性的评估

1.4.1 平滑性指标的定义

在等深线化简过程中,不仅要确保其遵守航海安全性准则和航行资源利用准则,而且还要尽可能遵守平滑性准则,即尽可能地使化简后等深线平缓圆滑。本文拟采用等深线的弯曲度和光滑离差来评估等深线的平滑性。

1) 等深线的弯曲度

如图 2 所示,假设等深线是由一组二维点 $P_1, P_2 \dots P_n$ 组成的,以其中的 3 个点 P_{i-1}, P_i, P_{i+1} 为例进行分析,线段 $P_{i-1}P_i$ 与 P_iP_{i+1} 的夹角为 α 。曲线曲率的定义为曲线上某点的切线方向角对弧长的转动率,对于为折线段的等深线而言,可以用线段的长度近似替代弧长。所以,本文将折线段 $P_{i-1}P_iP_{i+1}$ 的弯曲度定义为线段 $P_{i-1}P_i$ 和 P_iP_{i+1} 的夹角与点 P_{i-1} 与 P_{i+1} 之间的图上距离的比值。根据折线段的弯曲度的定义,我们可以将某段或整条等深线的平均弯曲度定义为该段或该条等深线上的所有折线段的弯曲度的平均值。

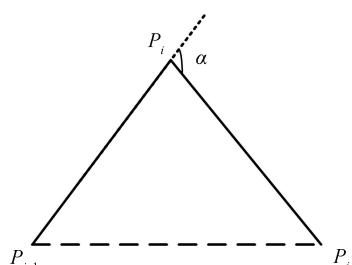


图 2 等深线的弯曲度示意图

Fig.2 Curvature of Depth-Contour

2) 等深线的光滑离差

如图 3 所示,借鉴文献[12]中二次 B 样条曲线具有最优拟合精度这一结论,采用二次 B 样条曲线拟合方法对折线段 $P_{i-1}P_iP_{i+1}$ 进行曲线拟合,拟合的曲线为 ADB ,线段 CD 是点 P_i 到曲线 ADB 的最短距离。我们将折线段 $P_{i-1}P_iP_{i+1}$ 的

点 P_i 到该折线段的二次 B 样条拟合曲线之间的最短距离定义为等深线的光滑离差。同样,根据折线段光滑离差的定义,本文将某段或整条等深线的平均光滑离差定义为该段或该条等深线上所有折线段的光滑离差的平均值。

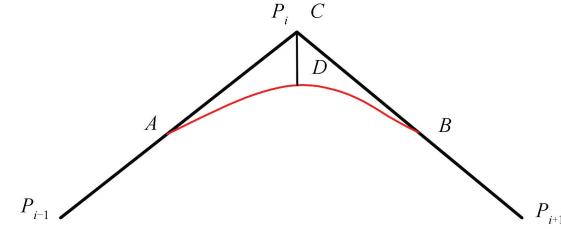


图 3 等深线的光滑离差示意图

Fig.3 Dispersion to a Smoothed Curve

1.4.2 平滑性指标的评估方法

1) 等深线的弯曲度的评估方法

根据折线段 $P_{i-1}P_iP_{i+1}$ 的弯曲度 ξ_i 的定义,得到计算式为:

$$\xi_i = \frac{\alpha_i}{l_i} \quad (4)$$

式中, α_i 表示线段 $P_{i-1}P_i$ 和 P_iP_{i+1} 的夹角; l_i 表示点 P_{i-1} 与 P_{i+1} 之间的图上距离。

根据某段或整条等深线的弯曲度 ξ 的定义,得到计算式为:

$$\xi = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{n-2} \xi_i \quad (5)$$

式中, n 表示组成某段或整条等深线的点的总数 ($n > 2$)。某段或整条等深线的弯曲度 ξ 的相关解释:某段或整条等深线 ξ 的值越大,则它的弯曲程度越大;反之,则它的弯曲程度越小。

2) 等深线的光滑离差的评估方法

根据文献[12],可以得到折线段 $P_{i-1}P_iP_{i+1}$ 的二次 B 样条曲线的矩阵为:

$$P(t) = \frac{1}{2} \cdot [t^2 \quad t \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 2 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{i-1} \\ p_i \\ p_{i+1} \end{bmatrix}, \quad t \in [0, 1] \quad (6)$$

在该段样条曲线上选取 $m+1$ 个等间隔点(包括点 P_{i-1} 与 P_{i+1}),并利用式(7)计算得到等间隔点的平面坐标:

$$P(t) = \frac{1}{2} [t^2 \quad t \quad 1] \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 2 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{i-1} \\ p_i \\ p_{i+1} \end{bmatrix}, \quad t = \frac{j}{m}, \quad j = 0, 1, \dots, m \quad (7)$$

在已知点 P_i 与这些等间隔点的平面坐标的

情况下,分别得到点 P_i 与每个等间隔点之间的距离 d_j :

$$d_j = \| P_i - P\left(\frac{j}{m}\right) \|, j = 0, 1, \dots, m \quad (8)$$

对点 P_i 与所有等间隔点之间的距离进行比较,得到折线段 $P_{i-1}P_iP_{i+1}$ 的光滑离差 γ_i ,其计算式为:

$$\gamma_i = \min\{d_1, d_2, \dots, d_m\} \quad (9)$$

根据某段或整条等深线的光滑离差 γ 的定义,得到计算式为:

$$\gamma = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{n-2} \gamma_i \quad (10)$$

式中, n 表示组成某段或整条等深线的点的总数。某段或整条等深线的光滑离差 γ 的相关解释:某段或整条等深线的 γ 的值越大,则它的光滑程度越差; γ 的值越小,则它的光滑程度越好。

2 等深线化简质量评估实验与分析

如图 4 所示,为了验证上述所提评估指标与

方法在航海图等深线化简质量的定量评估中的适用性,进行了 4 组实验。第 1、4 组实验采用已公开发行的数字海图。第 1 组实验中的数据分别为在比例尺 1:1.5 万和 1:3 万的两幅数字海图上的某段等深线,在 1:1.5 万海图上是化简前的数据,1:3 万海图上相对应的部分是化简后的数据。为了便于比对分析,将比例尺为 1:1.5 万海图上的等深线,经坐标变换、比例尺变换等处理后,其与比例尺为 1:3 万的海图等深线进行叠加显示,如图 4(a)所示。第 2 组、第 3 组实验是为第 1 组实验所设计的比对实验。第 2 组实验中的化简后等深线是某作业员在化简中故意不考虑安全性但仍考虑航行资源表达、平滑性的结果,如图 4(b)所示。第 3 组实验中的化简后等深线是某作业员在化简中不强调航行资源表达而着重考虑安全性、平滑性后的结果,如图 4(c)所示。第 4 组实验分别采用比例尺为 1:100 万和 1:230 万海图的某段对应等深线,比例尺为 1:100 万的为化简前的数据,将其与化简后的比例尺为 1:230 万的海图上的等深线进行叠加显示,如图 4(d)所示。

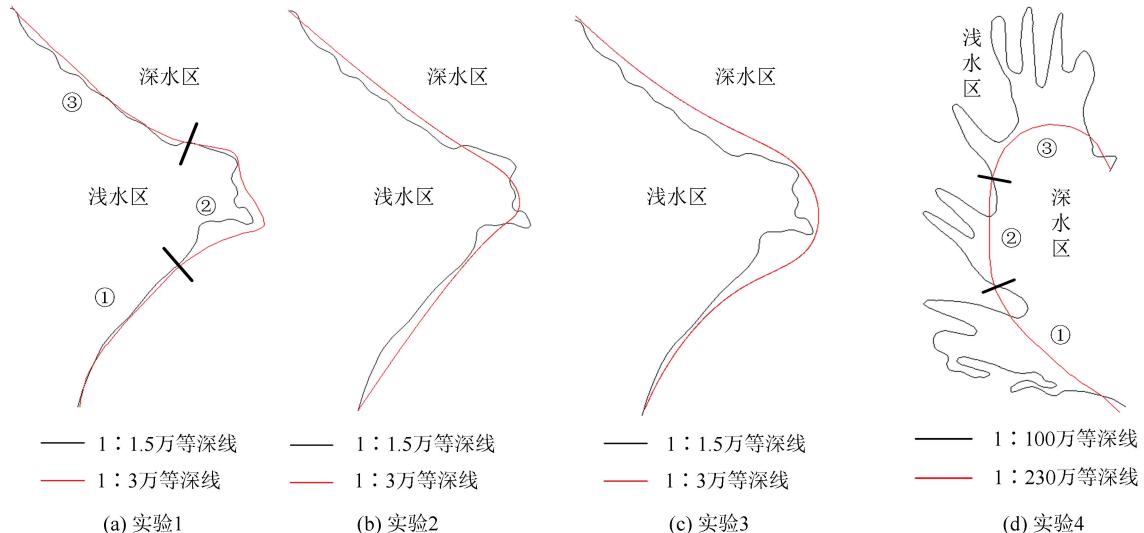


图 4 比对等深线

Fig.4 Depth-Contours Used for Comparison

2.1 安全性评估

根据式(1)~式(2),对等深线化简安全性指标定量计算,并与传统方法进行比对,结果见表 1。

传统的经验方法无法对结果进行定量评估。本文所提方法可定量计算化简后等深线的扩深长度百分比、平均扩深距离等指标,明确、精细地评估出化简后等深线在航海安全性方面的质量。

表 1 化简前后等深线安全性指标的分析比对

Tab.1 Comparison for the Navigational Safety of Depth-Contour Before and After Simplification

实验编号	扩深长度	平均扩深
	百分比/(%)	距离/mm
1	8.23	0.13
2	27.45	1.27
3	0.00	0.00
4	34.81	1.43

采用定量评估方法后,实验1的扩深长度占有一定的百分比,但平均扩深距离较小,在《中国航海图编绘规范》规定的线状要素误差范围之内。所以仍可认为实验1的安全性指标是达标的。这与实际也相符,因为实验1采用目前公开出版发行的大比例尺海图数据,其等深线化简已考虑了航海安全性。实验2中扩深长度百分比明显增大,平均扩深距离超出线状要素允许误差范围之内,安全性指标不达标,这是设计这组实验时故意不考虑安全性要求所引起的。实验3扩深长度百分比、平均扩深距离都为零,安全性指标很高,这是设计实验时特别强调了安全性后的结果。实验4为公开出版发行的小比例尺海图上等深线化简结果,扩深长度百分比和平均扩深距离都较大,这是因为小比例尺海图更多的是要合理表示地貌的整体趋势,对航海安全性无明确要求所导致。

2.2 航行资源表达的评估

进一步比较本文方法与传统经验方法在航行资源表达评估上的差异。根据式(3)进行计算,见表2。

表2 化简前后等深线航行资源表达的分析比对

Tab.2 Comparison for the Representation of Available Depth Space of Depth-Contour Before and After Simplification

实验编号	缩深面积百分比/(%)
1	4.95
2	6.51
3	13.26
4	38.22

传统经验方法只强调等深线化简过程中不能将大片深水区划入浅水区,不能堵塞航道,这些原则也只能通过海图制图人员的经验来简单判断、定性分析。而本文方法能通过缩深面积百分比来定量评估化简后等深线对可航行区域的表达情况。从表2可以看出,实验1、实验2的缩深面积百分比较小,这是公开出版海图化简结果展示的实验1和本文特意设计的实验2都考虑了航行资源表达的原因。实验3的缩深面积百分比较大,这是由于设计实验时没有强调航行资源表达的结果。实验4为小比例尺海图上等深线化简结果,缩深面积百分比最大,这是因为小比例尺海图上的等深线弯曲程度很大,化简时主要强调平滑性而没有考虑航行资源表达,且进行了大尺度化简的结果,但这对于该小比例尺海图来说,也是可以接受的。

2.3 平滑性的评估

为了进一步比较本文方法与传统经验方法在

平滑性评估上的差异,将形状有明显区别的图4(a)、图4(d)中的等深线分别分为3段。根据式(4)~式(10)进行计算,具体结果见表3、4。

表3 等深线的弯曲度的分析比对
Tab.3 Comparison of the Curvature of Depth-Contour

实验编号	区段编号	化简前	化简后
1	①	0.15	0.23
	②	2.74	1.02
	③	1.28	0.37
4	①	4.82	1.23
	②	4.54	0.22
	③	4.18	0.49

表4 等深线的光滑离差的分析比对
Tab.4 Comparison of the Dispersion to a Smoothed Curve

实验编号	区段编号	化简前	化简后
1	①	0.057	0.040
	②	0.037	0.056
	③	0.055	0.031
4	①	0.038	0.050
	②	0.039	0.036
	③	0.045	0.053

传统经验方法只能通过制图人员依靠经验定性感知等深线的平滑程度,本文方法能够对化简前后等深线的整体与局部的平滑程度进行定量评估。从表3可以看出,化简后等深线的弯曲度都要明显小于化简前等深线的弯曲度,而且各段化简前后弯曲度计算值的大小与本文从图4中得到的感性认知是一致的。从表4中可以看出,两组数据中的各区段的光滑离差相差不大,且都小于我们肉眼能明显感知的0.1 mm,这与图4中各区段都比较光滑且无明显差异是一致的。此外还可以看出,化简后等深线的光滑离差与化简前等深线的光滑离差相差不大,这是因为制图作业人员在化简等深线的过程中,已经有意识地保持等深线的光滑性。

2.4 综合分析

在直接用于舰船定位导航的海图特别是大比例尺海图的等深线化简中,航海安全性指标是首位的,我们期望扩深长度百分比、平均扩深距离都能为零,至少平均扩深距离不能超出线状要素表示的允许误差。其次应尽可能地将可利用的区域表示出来,这意味着航行资源表达指标也要重点考虑,缩深面积百分比越小越好,这一点在航道附近尤为重要。最后需要考虑化简后等深线平滑性。对于不直接用于舰船定位导航的海图,特别是小比例尺海图,安全性指标可不强求,更需关注航行资源表达指标和平滑性指标。从目前公开出

版发行的海图等深线化简比对情况来看,如实验1、实验4基本遵循这一准则。在具体实践中,不同指标相互间关系的处理,特别是航海安全性和航行资源表达冲突的处理,可能还会与具体比例尺、特定区域、表达目的等有关,这还需进行系统的研究。

3 结语

本文通过分析、计算及实验比对,定义了扩深长度百分比、平均扩深距离、缩深面积百分比、等深线的弯曲度与光滑离差,能分别从安全性、航行资源表达和平滑性3个方面明确且较为合理地反映出航海图等深线化简的质量。本文所提方法能明确、定量计算所定义指标的各项数值,这相对于传统经验方法来说,实现了从定性到定量的提升。

本文仍是一种探索性研究,如何合理确定这些指标的数值要求并应用于等深线的化简,还有待继续探索。

参考文献

- [1] Wang Houxiang, Li Jinjie. Generalization of Nautical Charts [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1999(王厚祥, 李进杰. 海图制图综合[M]. 北京: 测绘出版社, 1999)
- [2] Smith S. The Navigational Surface: A Multipurpose Bathymetric Database [D]. Durham: University of New Hampshire, 2003
- [3] Peters R. A Voronoi-and Surface-Based Approach for the Automatic Generation of Depth-Contours for Hydrographic Charts [D]. Delft: Delft University of Technology, 2012
- [4] GB12320-1998. Specifications for Chinese Nautical Charts [S]. National Quality Technical Supervision Department, 1998(GB12320-1998. 中国航海图编绘规范[S]. 国家质量技术监督局, 1998)
- [5] Yang Zujiao, Li Hongsheng, Zhang Qing. Progressive Simplification Methods of Contour Line Group Constrained by Topographic Features [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(4): 480-483(杨祖桥, 李洪省, 张青. 地理特征约束的等高线群渐进式简化方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(4): 480-483)
- [6] Guo Qingsheng, Huang Yuanlin, Zheng Chunyan, et al. Spatial Reasoning and Progressive Map Generalization [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007(郭庆胜, 黄远林, 郑春燕, 等. 空间推理与渐进式地图综合[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007)
- [7] Wu Fang, Deng Hongyan, Qian Haizhong, et al. Quality Assessment Models for Automatic Map Generalization [M]. Beijing: Science Press, 2009(武芳, 邓红艳, 钱海忠, 等. 地图自动综合质量评估模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009)
- [8] Lu Yi, Zhai Jingsheng, Du Jinghai, et al. Recognition, Measurement and Generalization for Point Cluster Features in Digital Nautical Chart [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(2): 133-139(陆毅, 翟京生, 杜景海, 等. 数字海图点群状特征的识别、量测与综合[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(2): 133-139)
- [9] Li Haisen, Lu Dan, Wei Yukuo, et al. Fast Algorithm of Contour Generation for a Multibeam Seafloor Terrain [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2012, 33(5): 622-628(李海森, 陆丹, 魏玉阔, 等. 多波束海底地形等深线快速生成算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(5): 622-628)
- [10] Guilbert E, Lin H. B-Spline Curve Smoothing for Isobathymetric Line Generalisation [J]. *Geographic Information Sciences*, 2005, 11(2): 78-86
- [11] Zhang Lihua, Liu Yanchun, Zhu Qing, et al. Analysis of Feasibility of Routing Based on Changing Water Levels [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(9): 892-895(张立华, 刘雁春, 朱庆, 等. 基于动态水位的航线可行性分析研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(9): 892-895)
- [12] Xu Kai. Analysis of Accuracy of Three Curve-Fitting Methods [J]. *Journal of Shanghai Tiedao University*, 1996, 17(3): 26-30(许恺. 三种曲线拟合方法的精度分析[J]. 上海铁道大学学报, 1996, 17(3): 26-30)

(下转第 508 页)

gy. Conventional mapping which uses the subdivision of multilevel tiles or multi-version storage to accomplish spatial multi-scale representations has the problems including data redundancy, inconsistency between diffident levels, the dramatic change in scale range and others. This study comprehensively applies various multi-scale representation strategies, including the cartography generalization and the spatial index technology, and put scale dimension and operations information in data model to build The Vector Spatial Data Pyramid Model. This model builds up key scale representations data and controls the scales space of every target through the off-line processing. And the process information, including the representation status of object, the longitudinal association between object A and object B in diffident levels, the generalize operators and parameters, is encapsulated in the attributes of objects through object-oriented modeling. Meanwhile, this model establishes scale transformation structure through one end and both end of the control. Based on the pyramid model, the generalization action can be executed in real-time to obtain continuous scale representation.

Key words: continuous multi-scale representation; pyramid model; map generalization; multi-scale data structure; scale transform

First author: YAN Xiongfeng, PhD candidate, specializes in spatial data matching and updating. E-mail: xiongfeng.yan@whu.edu.cn

Corresponding author: AI Tinghua, PhD, professor. E-mail: tinghua_ai@tom.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41531180, 41401447; the National High Technology Research and Development Program(863 Program) of China, Nos. 2015AA1239012, 2015AA124103.

(上接第 501 页)

Indices and Methods for Evaluating Quantificationally the Quality of Simplification of a Depth-Contour in Nautical Chart

ZHANG Lihua^{1,2} WEN Lianfa^{1,2} JIA Shuaidong^{1,2}

1 Department of Hydrography and Cartography, Dalian Navy Academy, Dalian 116018, China

2 Key Laboratory of Hydrographic Surveying and Mapping of PLA, Dalian Navy Academy, Dalian 116018, China

Abstract: To address the limitation that the quality of simplification of a depth-contour in nautical chart can only be analyzed qualitatively, not quantificationally, these indices including the contour length of extending deep area, the mean distance of extending deep area, the reducing deep area, the curvature and the dispersion to a smoothed curve are defined, respectively from the safety of navigation, the representation of available depth space and the smoothness, the corresponding evaluating methods are proposed, and the indispensable formulas are concluded. The experimental results demonstrate: (1) the defined indices can effectively and reasonably estimate the quality of simplification of depth-contour in nautical chart from the safety of navigation, the representation of available depth space and the smoothness; (2) the proposed methods can estimate the quality of depth-contour simplification and overcome the shortcoming of the existing methods which can only analyze qualitatively.

Key words: depth-contour; simplification; quality; quantitative evaluation

First author: ZHANG Lihua, PhD, professor, specializes in marine surveying and mapping. E-mail: zlhua@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41471380, 41171349, 41601498, 41774014.