

# 自适应步长的海洋流线构造算法

季 民<sup>1</sup> 陈 丽<sup>1</sup> 靳奉祥<sup>1,2</sup> 李 婷<sup>1</sup> 王春晓<sup>1,3</sup> 孙 勇<sup>1</sup>

1 山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛, 266590

2 山东建筑大学, 山东 济南, 250101

3 海南省测绘地理信息局, 海南 海口, 570203

**摘 要:**为深入研究海洋流场的结构特征,在临界点理论的支持下,根据不同的临界点类型提出了充分考虑流场结构特征的初始质点源布置策略,并根据原始网格矩阵中局部网格的流速和流向,提出了一种具有更宽泛步长调整适用度的自适应步长计算模型。该模型可根据具体流场特征实现步长增长倍数和全局步长增长控制的双自由度调整,同时可满足同向加速和逆向减速的步长控制。为实现流线在全局流场中的合理化布置,提出了基于平滑窗口的流线密度调整策略。对全球海洋流场进行可视化实验,结果表明,本文算法在海洋流场结构特征的表达中应用效果较好。

**关键词:**流场可视化; 流线追踪; 临界点理论; 海洋流场; 自适应步长算法

**中图分类号:**P229.2; P208 **文献标志码:**A

流场表达是科学计算可视化的重要组成部分,众多学者已对其进行了许多卓有成效的研究工作<sup>[1-13]</sup>。目前,针对二维矢量场可视化表达的方法主要有直接可视化、几何可视化、基于纹理的可视化、特征可视化等<sup>[2-3]</sup>。直接可视化运用图标和颜色编码法进行研究,对于小尺度、简单二维矢量场的表达具有一定优势;基于纹理的可视化采用纹理映射技术,对表达二维图像空间的连续性、一定的几何形状和方向性具有明显的优势;特征可视化方法通过对流场中复杂特征结构的描述,可以采用较少的几何绘制原语表示复杂的流场信息<sup>[4]</sup>,能有效描述流场中的重要结构区域信息,并有效剔除冗余数据<sup>[5]</sup>。而几何可视化是通过将原始矢量场数据中抽取时线、脉线、迹线、流线等几何形体来进行流场的可视化表达,针对定常流和长时间序列的宏观流场特征对比具有一定优势。海洋流场在全球尺度下具有一定的定常流特征,对于宏观尺度下大气环流结构、热气交换,以及各种物理、化学、生物、地质过程等,都具有重要的影响和制约作用。因此,针对海洋流场表达的特殊性,本文提出了基于临界点理论的初始质点源布置策略,并综合考虑局部网格点的流速和流向,提

出了一种具有较大适应度的自适应步长计算模型,并通过实验分析证明了该算法的有效性。

## 1 流线构造算法概述

流线生成方法主要有数值积分法与流函数构造法两种。目前,多数文献主要集中在数值积分算法的研究,而数值积分算法的区别主要在于初始质点源的放置、数值积分的方法和跟踪步长的选取等方面。

针对初始质点源的放置,文献<sup>[3]</sup>在二维流场可视化研究中,使用基于图像的初始质点源布置策略,通过引入能量函数,实现了均匀流线的生成<sup>[3]</sup>。文献<sup>[6]</sup>提出了基于分形理论的流场采样方法,通过计算各区域的分形维度来确定各个区域采样的疏密程度。文献<sup>[7]</sup>提出了流场引导的放置方法,通过在流场关键点附近放置种子点来生成流场,实现了流场结构特征的有效表达。在文献<sup>[6]</sup>的启发下,本文采用了基于流场引导的初始质点源布置策略。

针对流线的数值积分方法主要有欧拉法、二阶龙格库塔法和四阶龙格库塔法等<sup>[8]</sup>。欧拉方法

收稿日期:2013-04-12

项目来源:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20113718110001);国家科技支撑计划资助项目(2012BAH27B04, 2011BAC03B03);海洋公益性行业科研专项资助项目(2011418017);山东科技大学科研创新团队支持计划资助项目(2011KYTD103);海岛(礁)测绘技术国家测绘地理信息局重点实验室开放研究基金资助项目(2011A04)。

第一作者:季民,博士,副教授,主要从事空间数据组织与GIS应用系统开发研究。E-mail: jamesjimin@126.com

是最简单的一种数值积分方法,如式(1)所示:

$$X(t + \Delta t) = X(t) + \Delta t \times V(X(t)) \quad (1)$$

采用欧拉公式计算具有简便快捷性,为了验证本文其他改进策略的可行性,本文采用欧拉法进行流线积分运算。

在流线积分过程中,大多传统积分算法采用固定步长,但由于固定步长无法适应积分曲线的多种曲率变化情形,使得积分曲线精度较差,为此人们提出了自适应步长的计算方法,如文献[9]提出了步长与格网大小和速度矢量成倒数相关的自适应步长的确定方法,但该方法计算复杂、运算量较大。因此,在综合考虑流速和流向的情况下,本文提出了一种新的流线积分自适应步长计算模型。

## 2 基于流场引导的自适应步长流线构造算法

### 2.1 初始质点源的布置策略

流线的整体布局是由初始质点源布置策略来决定的。本文根据临界点理论进行初始质点源的布置。所谓临界点是三维矢量场中三个速度分量均为零的点,通过计算速度矢量对位置矢量的偏导数矩阵——雅可比矩阵,并根据雅可比矩阵特征值实部和虚部的正负进行临界点分类,一般分为排斥聚点、吸引聚点、马鞍点、中心点、排斥交点和吸引交点 6 大类型,如图 1 所示<sup>[1]</sup>。

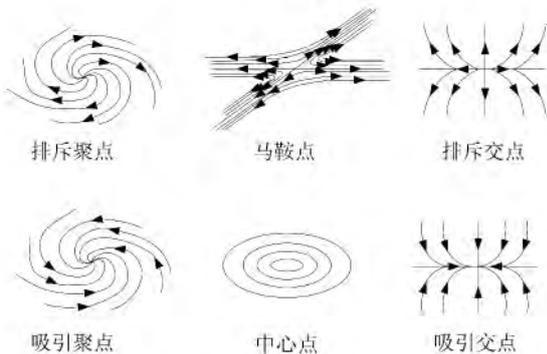


图 1 临界点的分类<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Classification of Critical Points<sup>[1]</sup>

具体进行初始质点源布置时,根据临界点的不同类型,在其周围进行初始质点源不同方式的布置和选择。如图 2(a)当临界点为中心点时,根据中心点周围流线的分布特征,按照一定步距将初始质点源布置在临界点一侧。如图 2(b)当临界点为交点或聚点时,以临界点为中心,采取等距离均匀布点方案进行初始质点源放置;图 2(c)当

临界点为马鞍点时,质点源需要按照图示的 4 个方向进行扩展。

### 2.2 自适应步长流线追踪

初始质点源布置完成后,即进入流线追踪过程,为了避免固定步长所引起的计算过缓、不能适应多种曲率变化的情形,本文提出了自适应步长的流线追踪算法,具体计算过程如下。

#### 2.2.1 自适应步长计算模型设计

自适应步长计算时,需遵循几项原则:

- 1) 原始网格流速为零,网格对应步长为零;
- 2) 当前网格的流向与流进网格的流向基本一致,则成倍增长积分步长;
- 3) 当前网格的流向与流进网格的流向近似逆向,则成倍缩小积分步长。

根据上述原则,本文设计了如式(2)所示的自适应步长计算函数模型:

$$D_{ij} = D\mu\alpha_{ij}(\sigma + \alpha_{ij})^{-(\cos\theta_{ij}-1)^2+1} \quad (2)$$

其中, $D_{ij}$ 表示原始网格矩阵中第  $i$  行、第  $j$  列的网格所对应的积分步长; $D$ 表示单元网格的实际尺寸大小; $\mu$ 表示全局步长增长控制参数,一般取小于或等于 1 的正数值,该参数主要用于减缓步长增长倍数,实现步长增长的平衡控制; $\alpha_{ij}$ 表示当前网格流速与流场中最大流速的比值,因此该值的取值范围为 $[0, 1]$ ,当该值为 0 时,表示当前网格流速为零,当为 1 时,表示为最大流速值; $\delta$ 表示步长增长倍数,一般取大于 1 的整数值,该值越大表示步长增长越快; $\theta_{ij}$ 表示当前网格流向与流进网格流向的夹角,夹角越大,说明流向变化越大,其取值范围为 $[0, \pi]$ ,0 时表示两网格同向, $\pi$ 表示两网格逆向。

根据式(2),当  $\alpha_{ij} = 0, D_{ij} = 0$  时,满足第一条原则;当  $\theta_{ij} = 0$  时, $D_{ij} = D\mu\alpha_{ij}(\sigma + \alpha_{ij})$ ,则满足第二条原则,步长按  $\delta$  倍增长;当  $\theta_{ij} = \pi$  时, $D_{ij} = D\mu\alpha_{ij}(\sigma + \alpha_{ij})^{-3}$ ,则满足第三条原则,步长按  $\delta^{-3}$  倍迅速缩小。

通过以上分析可见,该自适应步长的计算模型综合考虑了流速和流向因素,使用者可以根据具体的流场特征进行步长增长倍数  $\delta$  和全局步长增长控制参数  $\mu$  的双自由度调整。同时,该函数模型可以满足同向情况下步长的快速增加和逆向情况下步长的更加快速的锐减的情形,因此具有更加宽泛的步长调整适用度。

#### 2.2.2 流线追踪

根据自适应步长计算模型,依次选取初始质点源集合中的质点,逐点进行流线双向追踪和流线合并。在追踪过程中,需不断修正初始质点源

追踪状态和已追踪过的格网信息。初始质点源的状态主要分为流线起点和被流线追踪穿过两种状态,网格信息主要记录已经穿过该网格的流线条数。

流线追踪的终止条件为:一是追踪流线长度过长,已经达到或超过设定的最长阈值;二是当前经过网格的流线条数已经达到设定的阈值;三是到达场边界;四是当前所在格网流速为零;五是当前追踪步长小于阈值步长。

流线合并的条件为:一是计算当前流线终点  $P_n$  与当前网格中心点  $P_0$  的距离是否小于设定的阈值,若是则两条流线合并;二是计算线段  $P_{n-1}P_n$  与  $P_{n-1}P_0$  的夹角是否小于设定的阈值  $\theta$ ,若是则两条流线合并。

### 2.3 流线密度布局调整

流线密度布局调整需遵循两个原则,一是构造的流线尽量长,二是尽量能够使流线布满整个流场。因此,本文提出了窗口平滑的流线密度调整策略。首先,为了避免短流线扰乱流场的总体特征,通过最短长度阈值的设定,实现了短流线的剔除。其次,利用一定网格尺寸的平滑窗口遍历整个流场,当前窗口中不存在其他质点源且不存在流经次数超过阈值的网格时,则进行附加质点源的添加。

如图3所示,A区存在初始质点源,B区存在流经次数超过阈值的网格,则不能进行附件质点源添加,而C和D区域则满足放置附加质点源的条件。附加质点源确定后,即可遵照上述的自适应步长流线追踪方法进行双向追踪。

## 3 全球海洋流场流线构造实验分析

本文采用的数据是在全球海洋环流模式MOM4基础上,融合卫星观测和实测资料进行同化分析所得到的全球流场网格化的NetCDF格式数据,原始数据量为5.4 GB,网格分辨率为 $0.25^\circ$ ,时间跨度为7个月。针对表层流场数据,本文抽取了各网格的按月平均的 $U$ 、 $V$ 分量,共7个月的数据,并进行了相应流速和流向计算,流向范围为 $[0, 2\pi)$ ,将抽取的7个月的全球海洋表层流场的网格数据分别采用固定步长算法和本文的基于流场引导的自适应步长流线追踪算法进行了流线构造,实验对比结果如表1所示。

由表1的对比结果看,自适应步长算法在效率上接近于固定步长算法,但其数据结果的存储量和生成的流线条数均大大减少。为方便观察

表1 两种算法对比结果

Tab.1 Comparing of Two Algorithms Calculating Results

期次	结果					
	结果数据量/MB		运算时间/s		生成流线条数/条	
	固定步长	自适应步长	固定步长	自适应步长	固定步长	自适应步长
1月	158	18.6	8	10	3 336	2 460
2月	162	18.5	9	10	3 430	2 481
3月	159	18.1	8	11	3 358	2 489
4月	159	18.0	10	10	3 377	2 501
5月	159	17.9	10	11	3 332	2 442
6月	157	17.8	10	12	3 286	2 410
7月	158	17.5	10	12	3 314	2 384

流线跟踪的最终计算效果,根据文献[14-16]提出的二维矢量场拓扑化简与时序表达的思想,借助文献[17-18]的三维流场和三维矢量场表达算法,在三维球体模型上进行了流线追踪计算结果的可视化模拟(见图4)。从图4的对比效果图中也可

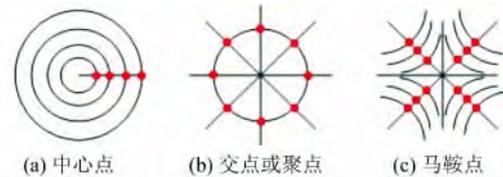


图2 初始质点源布置策略图(红点为初始质点)

Fig.2 Placement Strategy of the Initial Seed Points (Red Points)

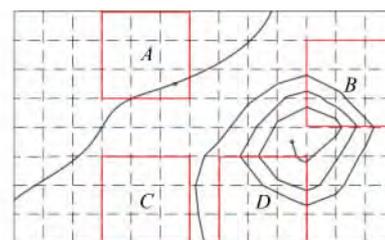


图3 附加质点源示意图

Fig.3 Additional Seed Points

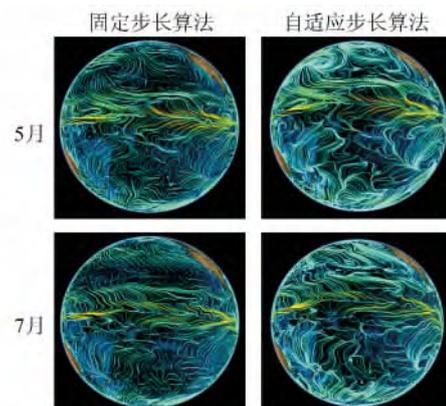


图4 全球海洋流场流线可视化效果对比

Fig.4 Comparison of Globe Marine Fluid Flow Streamline Visualization

以看出,固定步长算法会产生大量短流线,不仅造成了流线数据冗余,而且在可视化效果上扰乱了整个流场的连续性;而自适应步长算法则剔除了较多的短流线数据,不仅使流线的连续性得到提高,而且通过流线密度的调整,使流线在整个流场布置得更加美观合理,整个流场结构特征也清晰可见。

## 4 结 语

针对全球海洋流场可视化问题,本文在借鉴前人研究的基础上,以临界点理论为指导,通过区分不同的临界点类型,提出了初始质点源的不同扩展策略,从而为海洋流场结构特征的表达奠定了基础。本文通过所提出的自适应步长计算模型,构造了综合考虑局部网格流速和流向的自适应步长矩阵,实现了在海量网格矩阵数据中进行流线的快速生成,并通过提出的平滑窗口附加质点源探测与追加方法,实现了流线在全局流场中的均匀化、合理化布置。针对该算法的进一步扩展,可通过初始质点源的分级跟踪,实现流场宏观结构到微观结构的合理过渡和可视化表达,同时通过考察流向变化的快慢,进行自适应步长模型的进一步优化。

## 参 考 文 献

- [1] Tang Zesheng. The Visualization of 3D Data Field[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999(唐泽圣. 三维数据场可视化[M]. 北京:清华大学出版社, 1999)
- [2] Li Xiacong. Feature Extraction of Ocean Field Vortices and Visualization Research[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009 (李晓聪. 海洋流场涡旋特征提取及可视化研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2009)
- [3] Turk G, Banks D. Image-Guided Streamline Placement[C]. ACM Siggraph, New Orleans, 1996
- [4] Xu Huaxun, Li Sikun. Fuzzy Description and Extracting Methods of Complex Feature Regions in Flow Fields[J]. *Journal of Software*, 2011, 22(8):1 960-1 972 (徐华勋, 李思昆. 复杂流场特征区域模糊描述与提取方法[J]. 软件学报, 2011, 22(8):1 960-1 972)
- [5] Xu Huaxun, Ma Qianli. The Topology Voronoi Graph of Visualizing Local Vector Field[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2011, 48(4):666-674 (徐华勋, 马千里. 有界区域流场拓扑 Voronoi 图可视化[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(4):666-674)
- [6] Chen Li, Peng Qunsheng. Sampling Flow Fields based on Fractal Analysis[J]. *Chinese Journal of Computers*, 1997, 20(7):616-622(陈莉, 彭群生. 基于分形的流场采样方法[J]. 计算机学报, 1997, 20(7):616-622)
- [7] Verma V, Kao D, Pang A. A Flow-Guided Streamline Seeding Strategy[C]. IEEE Visualization, Salt Lake City, Utah, USA, 2000
- [8] Post F H, Vrolijk B. Feature Extraction and Visualization of Flow Fields[C]. Eurographics 2002, Saar, Germany, 2002
- [9] Post F H, Vrolijk B. The State of the Art in Flow Visualization: Feature Extraction and Tracking[J]. *Computer Graphics Forum*, 2003, 22(4):774-792
- [10] Cui Jiasheng. Research and Application of Streamline Visualization Technology[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008 (崔加胜. 流线可视化技术的研究与应用[D]. 镇江:江苏大学, 2008)
- [11] He Yawen, Du Yunyan, Su Fenzhen, et al. Remote Visualizations of Sea Flow Field with Spatial Information Grids[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(3):350-352 (何亚文, 杜云艳, 苏奋振, 等. 利用空间信息网格的海流场远程可视化[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(3):350-352)
- [12] Ma Jingsong, Zhu Dakui. Visualization Modeling and Virtual Reality for Coastal Ocean Tidal Current Numerical Simulation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2002, 31(1):49-53 (马劲松, 朱大奎. 海岸海洋潮流模拟可视化与虚拟现实建模[J]. 测绘学报, 2002, 31(1):49-53)
- [13] Liu Zhanping, Robert J. Moorhead II, et al. An Advanced Evenly Spaced Streamline Placement Algorithm[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2006, 12(5):965-972
- [14] Tricoche X, Scheuermann G, Hagen H. A Topology Simplification Method for 2D Vector Fields[C]. IEEE Visualization, Los Alamitos, CA, 2000
- [15] Tricoche X, Scheuermann G, Hagen H. Topology-Based Visualization of Time-Dependent 2D Vector Fields[C]. Data Visualization 2001, Aire-la-Ville, Switzerland, 2001
- [16] Helman J L, Hesselink L. Visualizing Vector Field Topology in Fluid Flows[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1991, 11(3):36-46
- [17] Interrante V, Grosch C. Visualizing 3D Flow[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1998, 18(4):49-53
- [18] Weinkauff T, Theisel H, Hege H C, et al. Topological Construction and Visualization of Higher Order 3D Vector Fields[J]. *Computer Graphics Forum*, 2004, 23(3):469-478

## Adaptive-Step Based Marine Fluid Flow Streamline Constructing Algorithm

Ji Min<sup>1</sup> CHEN Li<sup>1</sup> JIN Fengxiang<sup>1,2</sup> LI Ting<sup>1</sup> WANG Chunxiao<sup>1,3</sup> SUN Yong<sup>1</sup>

1 Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

2 Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China

3 Hainan Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Hainkou 570203, China

**Abstract:** The visualization of vector fields has become an important means for the expression of flows in many different disciplines. In order to express a marine fluid flow's structure more clearly, based on critical point theory, we present a new seeding point placement strategy and a new adaptive-step computation model. Considering a local cell's velocity and flow direction jointly with two degrees of freedom, it adjusts the steps by using two parameters and realizes the step acceleration and deceleration according to the flow direction. For the placement of the global flow field streamlines, we also give a new streamline density adjustment strategy based on a smoothing window. Experimental analysis of a global ocean flow visualization shows that this algorithm better expresses the marine fluid flow structure and suggests a reasonable placement of streamlines.

**Key words:** flow field visualization; streamline tracking; critical point theory; marine fluid flow; adaptive-step algorithm

**First author:** Ji Min, PhD, associate professor, specializes in theories and methods of spatial data organization and GIS application development. E-mail: jamesjimin@126.com

**Foundation support:** The Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China, No. 20113718110001; the National Key Technology R&D Program of China, Nos. 2012BAH27B04, 2011BAC03B03; Research Fund of Marine Public Industry Research, No. 2011418017; SDUST Research Fund, No. 2011KYTD103; Open Research Fund Program of Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reef, State Bureau of Surveying and Mapping, No. 2011A04.