

李婷, 季民, 靳奉祥, 等. 海洋流线积分自适应步长计算模型研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(3): 95—101, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.03.009

Li Ting, Ji Min, Jin Fengxiang, et al. Research on adaptive-step calculation model of marine fluid flow numerical integration[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(3): 95—101, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.03.009

海洋流线积分自适应步长计算模型研究

李婷¹, 季民^{1*}, 靳奉祥², 廖忠云¹, 孙勇¹

(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)

摘要: 针对步长固定的传统流线数值积分中造成的计算不精确或无谓计算过多的问题, 文献[15]提出了一种自适应步长的海洋流线构造算法, 该算法中的自适应步长计算模型可综合考虑局部网格的流速和流向, 具有双自由度调整的优点, 但也存在着邻近网格流向改变过大造成的追踪不持续、网格内流速过缓造成的迭代死循环等问题, 为此本文提出了一种新的自适应步长计算优化模型, 优化后的模型在保持原模型优点的基础上, 通过限定积分步长的下限取值范围, 解决了流线追踪不连续及计算迭代死循环问题, 同时通过调整参数 μ 及 δ 在模型中的控制范围, 使积分步长的适用度更加宽泛, 从而提高了算法的计算效率、减少了数据存储量, 并避免了流线混叠及锯齿现象, 通过大量试验及三维可视效果的对比分析, 验证了算法的可行性和有效性。

关键词: 海洋流场; 流线追踪; 数值积分; 自适应步长; 流场引导算法

中图分类号: P731.21

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2018)03-0095-07

1 引言

随着海洋时空探测技术的不断发展, 人们对海洋要素时空可视化表达的需求也越来越迫切, 流线作为海洋流场时空表达的重要手段, 其构造算法也成为了流场研究的热点^[1-10]。目前, 流线构造算法主要有流函数法和质点追踪算法, 其中质点追踪算法中的图像引导方法^[3-6]和流场引导方法^[7-9]最具代表性, 图像引导方法是通过能量函数最小化的过程迭代, 来控制流线的密度, 从而使生成的流线尽可能的均匀分布, 而流场引导方法则根据临界点周围的流场特征进行种子点布置, 并在空白区域随机布置附加种子点, 从而保证流场特征的不致丢失。质点追踪算法多采用数值积分法进行流线的构造生成, 其中积分步长的

选择非常关键, 若步长过短则增加计算的工作量, 若步长过长则会降低计算结果的精度, 为此研究人员提出了多种自适应步长计算方法, 如 Buning^[9]提出的步长与格网大小和速度矢量成倒数相关的方法, 由于其计算较为复杂, 未被广泛采用, 又有很多学者考虑速度矢量在方向上的变化, 通过计算相邻流线向量之间的夹角, 来进行流线积分步长的自适应调整^[10-14], 并根据设定的角度阈值将当前步长取值为 3 种情形, 由于该类方法步长调整的自由度偏低, 为此文献[15]在流场引导方法的启发下, 提出了一种新的自适应步长海洋流线构造算法 (adaptive-step based marine fluid flow streamline constructing algorithm, 简称为 AMFCA 算法)。AMFCA 算法基于多级分辨率的全球海洋流场网格数据, 通过全局步长控制参数 μ 和步长增

收稿日期: 2017-04-10; 修订日期: 2017-05-13。

基金项目: 国家自然科学基金(41471330); 国家青年科学基金项目(41401439); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20113718110001)。

作者简介: 李婷(1982—), 女, 山东省聊城市人, 博士生, 主要从事海洋时空数据建模及可视化研究。E-mail: liting_sdust@126.com

* 通信作者: 季民(1970—), 男, 山东省齐河县人, 博士, 教授, 主要从事地理信息系统设计与开发。E-mail: jamesjimin@126.com

长倍数 δ 的双自由度调整,构造了综合考虑局部网格流速和流向的自适应步长矩阵,实现了全球流场主流线的生成及均匀化布置。本文即在 AMFCA 算法的基础上,通过对双自由度参数控制范围的调整,提出了一种新的海洋流线积分自适应步长计算模型,实现了 AMFCA 算法的改进和优化,并通过大量试验验证了新模型的高效性和可行性。

2 基于流场引导的海洋流线构造算法原理

流场引导的流线生成算法,由于其特殊的优势而受到研究者的青睐,基于流场引导的海洋流线构造过程主要分为种子点布设策略、数值积分方法选择和积分步长计算等^[15]。

2.1 种子点布设策略

流场中流线的布置以均匀分布和长流线为佳,因此流场中作为流线积分起始质点源的种子点的布置就非常关键。目前常用的种子点放置算法主要包括:随机放置法、等距离放置法、均匀分布放置法、邻近种子点放置法、流场拓扑引导放置法、基于关键点的放置法、最远种子点放置法、基于相似性的放置法、图像引导放置法、基于出入流差异的放置法、基于信息熵的放置法等^[16-21]。不同的种子点布设策略均有其各自的优势,而流场引导的种子点布设策略就是基于关键点的放置方法。该方法通过计算速度矢量对位置矢量的偏导数矩阵——雅柯比矩阵,然后根据计算结果,将流场中 3 个速度分量均为 0 的点作为关键点,并将关键点分为排斥聚点、吸引聚点、马鞍点、中心点、排斥交点和吸引交点等 6 种类型,然后根据不同关键点类型,在其周围按照不同策略进行种子点布置。该方法可较好的保留海洋流场的整体拓扑特征,能更有效地创建等间距流线。

2.2 流线数值积分方法

目前流线数值积分的主要方法有欧拉法(Euler)、二阶龙格库塔法(Runge-Kutta)和四阶龙格库塔法等,其中欧拉法最为简单,属于一阶方法,但由于其计算精度不高,因此并不被人们常用。四阶龙格库塔法计算精度最高,但计算较为复杂,因此在很多流线追踪算法中,人们采用折衷的二阶龙格库塔法进行流线积分运算,具体二阶龙格库塔法的计算公式如式(1)所示:

$$\begin{cases} X(t + \Delta t) = X(t) + \frac{1}{2}(K_1 + K_2) \\ K_1 = \Delta t \times V(X(t)) \\ K_2 = \Delta t \times V\left(X(t) + \frac{K_1}{2}\right) \end{cases}, \quad (1)$$

式中, Δt 为积分步长。

2.3 AMFCA 算法中自适应步长计算模型

传统的数值积分算法大多数采用固定的积分步长,由此造成的问题是:当流线上相邻向量流向相同时,步长取值太小,容易造成无谓增多的递推计算;当相邻向量流向差异较大时,步长取值太大,流线积分的精度则难以保证。为此人们提出了许多自适应步长计算模型,其中比较典型的是根据相邻向量之间的点积进行向量夹角的计算,并设定一个夹角的上限阈值(大值)和下限阈值(小值),若算得的夹角在两个阈值之间,则保持原步长不变,若夹角大于上限,则取原步长的一半,若夹角小于下限,则新步长取原步长两倍。该模型计算固然计算简单,但割裂了流线曲率变化的连续渐变特征,为此基于规则网格的海洋流场数据,2014 年季民等^[15]提出了一种同时顾及网格流速和流向的自适应步长计算模型,具体模型如式(2)所示:

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

式中, D_{ij} 表示计算所的第 i 行、第 j 列网格的积分步长; D 表示流场中的数据网格尺寸; μ 表示全局步长增长控制参数,主要用于步长增长的平衡控制; α_{ij} 表示根据第 i 行、第 j 列网格点 U 、 V 分量值计算得到的网格的流速与流场中最大流速的比值,其取值范围为 $[0, 1]$; δ 表示步长增长倍数,一般取大于 1 的值; θ_{ij} 表示流入与流出当前网格两个流向的夹角,取值范围为 $[0, \pi]$ 。

在流线追踪过程中,该模型综合考虑了当前网格的流速和流向两个因素,通过设定 μ 和 δ 两个参数,实现了积分步长的双自由度调整,达到了同向网格积分步长的快速增长和逆向网格积分步长的迅速锐减。该模型相对于传统固定步长的积分算法,可适应积分曲线的多种曲率变化情形,并可使生成的流线更长、流线分布更加合理,并可大量减少短流线造成的数据冗余。

3 基于 AMFCA 算法的自适应步长计算改进模型研究

3.1 AMFCA 算法中原自适应步长计算模型的不足

近年来,通过不断的应用和实践,AMFCA 算法中原自适应步长计算模型(以后简称“原模型”)也逐渐表现出一些不足之处,主要体现在以下几个方面:

(1)全局步长控制参数 μ 取值固定后,生成的流线容易出现混叠交叉现象,因此,需要根据不同的原始格点数据的分辨率进行参数 μ 取值的不同设定;

(2)模型中流向夹角 θ_{ij} 的取值范围为 $[0, \pi]$,若流向改变过大,则计算得到的步长过短,当步长远小

于网格实际尺寸时,会出现迭代死循环现象,从而无法进入下一格网继续追踪;

(3)由于计算所得步长范围从接近于0到格网分辨率的几倍不等,当步长接近于0时,存储经过其所在格网的流线坐标数据过多,易出现内存溢出现象,当步长过长时,流线流经几个格网,无法记录流线流经网格,从而影响附加种子点的选取。

3.2 自适应步长计算模型的优化与改进

为了更好的适应海洋流场的多种拓扑结构特征变化,本文对 AMFCA 算法中原自适应步长计算模型进行了优化和改进,具体改进模型(以后简称“新模型”)如式(3)所示:

$$D_{ij} = D\mu(1 + a_{ij}\delta^{-(\cos\theta_{ij}-1)^2+1}). \tag{3}$$

新模型中的各参数含义遵循原模型的定义,优化后的新模型可解决以下几方面问题:

(1)无论网格流向如何变化,当网格流速很小,即 α_{ij} 接近于0时,原模型算得的积分步长也接近于0,从而造成流线过短,甚至出现死循环和内存溢出问题。在新模型中,当 α_{ij} 接近于0时,积分步长接近于 $D \cdot \mu$,相当于全局控制下的单步网格长度,从而避免了短流线,保障了流线追踪的连续性。

(2)模型中 μ 作为全局步长控制参数,可调节积分步长增长的快慢,若 μ 值取值固定后,当原始数据分辨率发生变化,尤其网格尺寸 D 变大时,积分步长也会变大,易于造成流线交叉混叠现象,也会使流场中的特征信息提取缺失。因此,新模型中针对 μ 的取值,依据网格分辨率变化而动态调整,当网格边长增加时,相应减小 μ 的取值,从而达到流线追踪步长变化的动态平衡。

(3)在确定种子点的追踪步长时,由于无法计算 θ_{ij} 的取值,因此在新模型中明确规定 $\theta_{ij}=0$,然后进行基于初始质点源的正向或逆向追踪。

(4)在算法模型中,当临近网格流向相同,即 $\theta_{ij}=0$ 时,原模型计算结果为 $D_{ij}=D\mu\alpha_{ij}(\delta+\alpha_{ij})$,新模型计算结果为 $D_{ij}=D\mu(1+\alpha_{ij}\delta)$,因为 $\alpha_{ij}\in[0,1]$,则原模型 $D_{ij}\in[0,D\mu(\delta+1)]$,新模型 $D_{ij}\in[D\mu,D\mu(\delta+1)]$ 。根据两个模型计算的步长取值范围可以看出,新模型取值范围可避免极短步长,并且可以达到与原模型同样的最大步长增长率,从而使流线追踪更加合理、算法效率更高。

(5) δ 在原模型中为步长增长倍数控制参数,而在新模型中变为局部控制参数,其密次取值随 θ_{ij} 的增加而递减,可有效减缓流向改变过大时步长增长的倍数,从而起到步长增幅的局部调整。

通过新模型的改进,解决了原模型存在的不足,减少了短流线,使流线追踪效率更高、流线分布更加合理。

4 模型试验对比分析

4.1 模型改进后的计算效率对比分析

为了验证模型改进后的计算效率,本文选用 NetCDF 格式的 全球海洋流场网格化数据,时间跨度为 7 个月,时间分辨率为逐月,空间分辨率为 0.25°,包含了温度、盐度、流场 U 分量、流场 V 分量等多维变量,垂向深度自海洋表层至海底分 50 层。本文分别按照原模型和改进后的模型对深度为 15 m,连续 7 个月份的全球海洋流场数据进行了流线构造试验。其中参数设定为: $\mu=0.5$,当 $0^\circ\leq\theta_{ij}\leq45^\circ$ 或 $135^\circ<\theta_{ij}<180^\circ$ 时取 $\delta=5$,当 $45^\circ<\theta_{ij}\leq135^\circ$ 时取 $\delta=3$ 。为了进行流线密度的合理化布局,设定流经网格的流线条数上限阈值为 4,同时为了避免过短流线的出现,设置流线双向追踪所经网格数不低于 10,经试验,模型改进前后的计算结果如表 1 所示。

表 1 两种模型计算结果
Tab.1 Comparing of two algorithms calculating result

月份	结果数据量/MB		运行时间/s		生成流线数/条	
	原模型	改进后	原模型	改进后	原模型	改进后
1月	77.5	11.5	15	11	1 322	2 186
2月	72.1	12.7	14	9	1 333	2 276
3月	68.1	11.7	15	10	1 301	2 210
4月	71.6	11.7	15	9	1 312	2 222
5月	72.5	11.4	14	9	1 248	2 173
6月	77.2	11.8	15	11	1 249	2 238
7月	77.3	11.1	14	10	1 290	2 184

通过表 1 的计算结果可以看出,模型改进后数据的存储量明显降低,这是由于原模型存在的过短步长的计算与大量冗余节点的存储所造成的,而新模型限定了步长的最低取值范围,使得流线存储的节点数大大降低;从计算效率上,模型改进后快了近 1/3 的时间,较大提高了流线生成的计算速度;另外,非常显著的优点是新模型生成的流线条数也接近翻了一倍,这使得生成的流线更加细腻,也更能详尽的反映流场的空间形态和分布特征。

为更好的对比模型改正前后的计算效果,根据文献[22]提出的实时二维矢量场拓扑简化方法和文献[23—24]提出的流场拓扑可视化思想及算法,借助 NASA World Wind 的三维球体模型,通过二次开发,本文在三维球体中实现了模型改进前后流线分布构造结果的可视化表达,具体表达效果如图 1 所示,其中图 1a、1c 分别表示采用原模型流线追踪算法得到

的 1 月和 2 月份的流线分布,图 1b、1d 分别表示采用新模型流线追踪算法得到的 1 月和 2 月份的流线分布。从对比图中可以看出,同样的参数条件下,由于新模型生成的流线条数较多,不仅使得流场的整体特征表达的更加清晰,同时很多局部特征也得以更细腻的反应。

4.2 新模型不同参数取值下的对比分析

新模型中的全局步长控制 μ 和局部控制 δ 两个参数的不同取值对于最后流线的构造质量至关重要,为了研究在其他不同分辨率尺度下参数的取值对结果的影响程度,本文选取 2014 年 12 个月空间分辨率为 1° 逐月的海洋流场网格数据进行了试验,选取的海洋深度依然为 15 m。由于网格尺度的变大,因此对 δ 参数的取值适当的进行了降低,具体为:当 $0^\circ \leq \theta_{ij} \leq 45^\circ$ 或 $135^\circ < \theta_{ij} < 180^\circ$ 时取 $\delta = 3$,当 $45^\circ < \theta_{ij} \leq 135^\circ$ 时取 $\delta = 2$,为使流线合理布局防止过密,设置流经网格

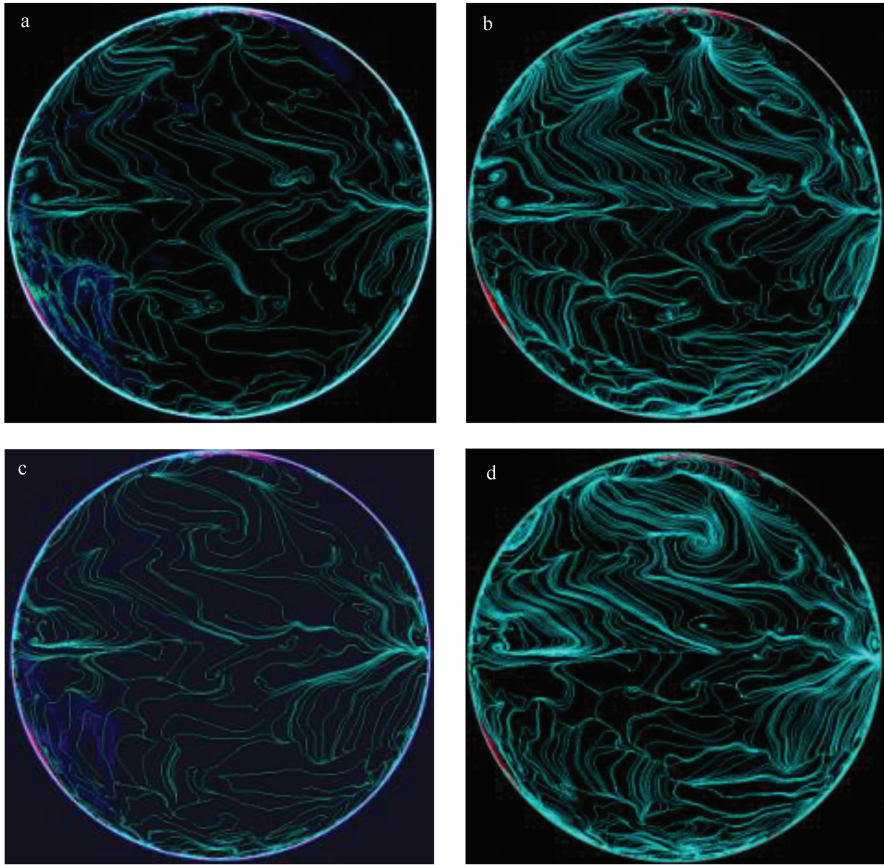


图 1 海洋流场可视化表达效果对比

Fig.1 Comparison of marine fluid flow streamline visualization

a,c 为原模型;b,d 为改进模型;a,b 为 1 月流场;c,d 为 2 月流场

a and c are generated by old model; b and d are generated by new model; a and b are January's ocean flow; c and d are February's ocean flow

的流线条数上限阈值为 8 条,为避免短流线,设置双向追踪网格数大于 5。根据以上的参数设置,当依然设定参数 $\mu=0.5$ 时,在 World Wind 的三维球体模型中查看流线表达效果时,发现存在流线交叉混叠现象,并且当

参数 μ 取值越大混叠现象越严重,具体如图 2 所示。
当降低 μ 取值设定参数 $\mu=0.2$ 时,在 World Wind 的三维球体模型可以看到流线具有良好的表达效果,具体如图 3 所示。

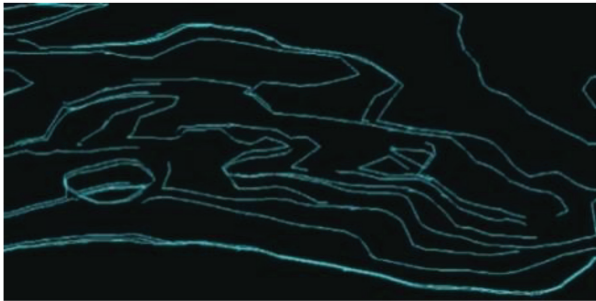


图 2 新模型中 $\mu=0.5$ 时流线分布
Fig.2 Streamline distribution when $\mu=0.5$ in new model

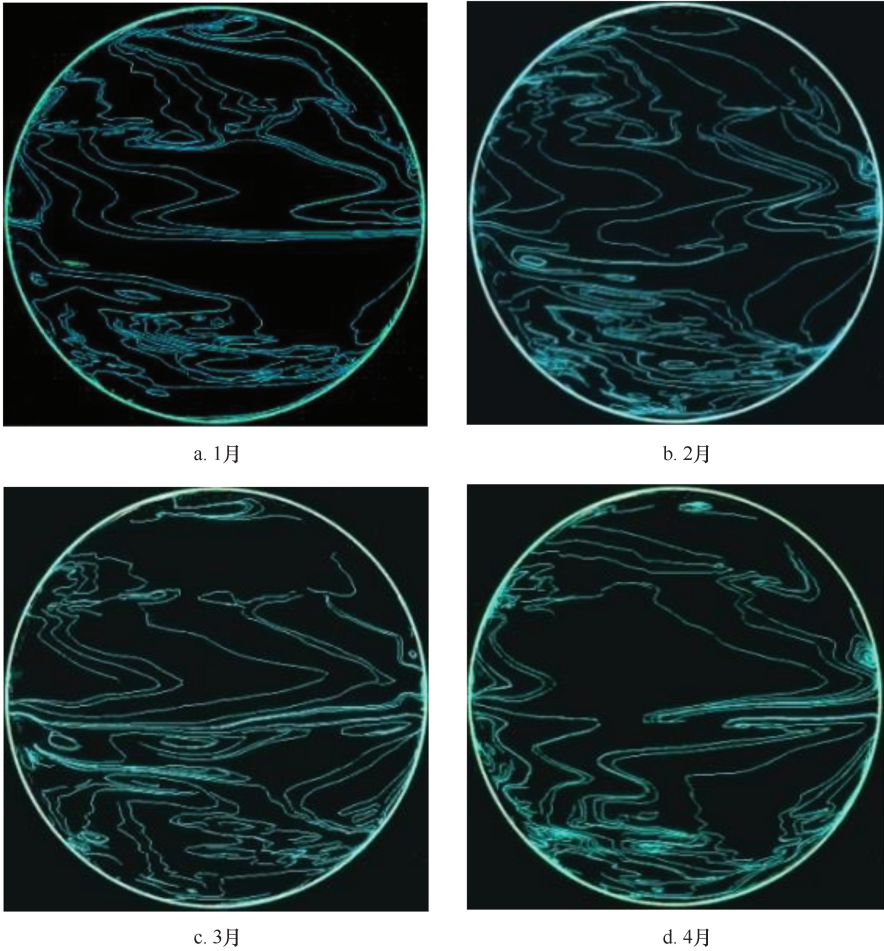


图 3 新模型中 $\mu=0.2$ 时流线分布
Fig.3 Streamline distribution when $\mu=0.2$ in new model

由以上的对比分析可以看出在不同的分辨率尺度下模型参数的设置不能一成不变,需要根据网格尺寸的变化进行参数的动态调整,为了避免流线追踪过程出现流线混叠,当网格尺寸变大时适当减小全局和局部控制参数的取值,从而使步长的增长控制在合理的范围内。

5 结论

随着海洋流场数值模式预报产品及海洋观测数据的不断丰富,人们对海洋流场的动态可视化提出了全新的需求,而 AMFCA 算法的提出为海洋流线快速提取及动态可视化提供了思路,本文即在 AMFCA 算法的基础上,针对原积分模型中当流向改变过大造成的追踪不连续、流速过缓造成的计算迭代死循环等问题,提出了一种新的积分步长计算改进模型,该模型通过调整参数 μ 及 δ 在模型中的控制范围,限定了积

分步长的下限取值范围,从而避免了原模型中存在的问题。通过大量试验及基于 Word Wind 平台的可视化对比分析,表明新模型在计算效率及流线生成条目上均有了明显的提升,同时降低了数据存储量,并提高了数据的检索效率。在流场数据的不同分辨率尺度下,为了验证参数 μ 及 δ 的取值范围,本文也通过大量实验进行了分析对比,并进行了双参数取值的合理设定,可为后续模型的应用分析提供重要参考。目前模型试验是以全球宏观尺度的数据为依据,也可将模型应用于局部海区的流线追踪,从而在中观尺度或微观尺度上进行海洋流场的可视化表达。同时由于参数 μ 及 δ 的取值对最终流线追踪的结果影响较大,目前是通过大量实验分析来确定双参数的合理取值区间,后期可重点研究双参数与尺度系数之间的相关关系,从而为不同时空尺度下的应用提供定量化的参数选取模型。

参考文献:

- [1] 韩敏, 张海超, 边茂松, 等. 流线增强型线性积分卷积流场可视化[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(12):2933—2938.
Han Min, Zhang Haichao, Bian Maosong, et al. FLOW visualization based on enhanced streamline line integral convolution[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(12):2933—2938.
- [2] Yu Hongfeng, Wang Chaoli, Shene C K, et al. Hierarchical streamline bundles[J]. Visualization & Computer Graphics IEEE Transactions on, 2012, 18(8):1353—1367.
- [3] Yan Tinghua, Feng Chong. Research and implement for flow field based on streamline technique[J]. Information Technology and Informalization, 2008, 10(3):51—53.
- [4] Turk G, Bank D. Image-guided streamline placement[C]//Conference on Computer Graphics & Interactive Techniques. 1996: 453—460.
- [5] Li Liya, Shen Hanwei. Image-based streamline generation and rendering[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(3):630—640.
- [6] Mao X, Hatanaka Y, Higashida H, et al. Image-guided streamline placement on curvilinear grid surfaces[C]//Proceeding of the IEEE Conference on Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1998:135—142.
- [7] Verma V, Kao D, Pang A. A flow-guided streamline seeding strategy[C]//Proceeding of the IEEE Conference on Visualization. Salt Lake City, Utah, USA: IEEE Computer Society Press, 2000:163—170.
- [8] Ye X, Kao D, Pang A. Strategy for seeding 3D streamlines[C]//Proceeding of the IEEE Conference on Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2005:471—478.
- [9] Buning P. Computer graphics and flow visualization in computational fluid dynamics[C]//Proceeding of Lecture Series Held in Rhode-saint-genese. Belgium: Von Karman Institute for Fluid Dynamics Press, 1989:1—10.
- [10] 任碧宁, 魏生民, 罗卫平. 三维 CFD 矢量场自适应流线耙并行计算[J]. 西安电子科技大学学报, 1999, 26(5):646—650.
Ren Bining, Wei Minsheng, Luo Weiping. Parallelization of an adaptive step particle tracing method on PVM[J]. Journal of Xidian University, 1999, 26(5):646—650.
- [11] 李海生, 杨钦, 陈其明. 三维计算流体力学流场的流线构造[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(5):434—437.
Li Haisheng, Yang Qin, Chen Qiming. Constructing streamlines in 3D CFD flow field[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(5):434—437.
- [12] 杨光, 成诗明. 基于四面体的三维流线构造[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 34(9):1061—1064.
Yang Guang, Chen Shiming. Tetrahedron-based constructing 3d streamlines in visualization[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 34(9):1061—1064.
- [13] 孙波. 三维流场流线放置方法研究[D]. 北京:北京理工大学, 2011.
Sun Bo. Streamlines placement for 3D flow fields[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2011.
- [14] 鲁大营, 朱登明, 王兆其. 三维流场的流线提取算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(5):666—673.
Lu Daying, Zhu Dengming, Wang Zhaoqi. Streamline selection algorithm for three-dimensional flow fields[J]. Journal of Computer-Aided Design

- and Computer Graphics, 2013, 25(5):666—673.
- [15] 季民, 陈丽, 靳奉祥, 等. 自适应步长的海洋流线构造算法[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2014, 39(9):1052—1056.
Ji Min, Chen Li, Jin Fengxiang, et al. Adaptive-step based marine fluid flow streamline constructing algorithm[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(9):1052—1056.
- [16] 纪鹏波. 基于 i4Ocean2.0 的海洋仿真与三维流场可视化应用研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2015.
Ji Pengbo. The application research of marine simulation and 3D flow visualization based on i4Ocean2.0[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [17] 丁少荣, 吴迪, 汪国平. 一种流线放置方法[J]. 软件学报, 2012, 23(2):42—52.
Ding Shaorong, Wu Di, Wang Guoping. A method of streamline placement[J]. Journal of Software, 2012, 23(2):42—52.
- [18] Liu Z, Moorhead R, Groner J. An advanced evenly-spaced streamline placement algorithm[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2006, 12(5):965.
- [19] Lefer W, Jobard B, Leduc C. High-quality animation of 2D steady vector fields[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2004, 10(1):2—14.
- [20] Chen Y, Cohen J D, Krolak J H. Similarity-guided streamline placement with error evaluation[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(6):1448—1455.
- [21] Mebarki A, Alliez P, Devillers O. Farthest point seeding for efficient placement of streamlines[C]//Proceeding of the IEEE Conference on Visualization, Los Alamitos:IEEE Computer Society Press, 2005: 479—486.
- [22] Tricoche X, Scheuermann G, Hagen H. Topology-based visualization of time-dependent 2D vector fields[C]//Proceeding of Data Visualizing 2001. Aire-la-Ville, Switzerland: Springer Vienna Press, 2001:117—126.
- [23] Interrante V, Grosch C. Visualizing 3D Flow[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1998, 18(4):49—53.
- [24] Weinkauff T, Theisel H, Hege H, et al. Topological construction and visualization of heigher order 3D vector field[J]. Computer Graphics Forum, 2004, 23(3):469—478.

Research on adaptive-step calculation model of marine fluid flow numerical integration

Li Ting¹, Ji Min¹, Jin Fengxiang², Liao Zhongyun¹, Sun Yong¹

(1. Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China)

Abstract: For the issues that existed in the old streamline numerical integration procedure which used the fixed integrating-step, such as inaccurate calculation results and unnecessary calculations, literature 15 presented the adaptive-step based marine fluid flow streamline constructing algorithm (AMFCA). The adaptive-step integration model in AMFCA could use the local grid's flow direction and velocity at same time, and had the advantage of adjusting the integrating-step in two degrees of freedom. But the model also had several issues, such as the streamline tracking process interruption when the adjacent grids' flow direction changes rapidly, the calculation endless loop when the flow velocity is close to zero, and so on. In order to solve these problems, the paper gave a new adaptive-step integration optimization model. This new model kept all the advantages of the old model, and by limiting the integral step's lowest value, it resolved the front issues. In addition to this, through adjusted μ and δ 's control ranges, the new model also made the applicability of integration step more widely, improved the computing efficiency, reduced the number of sampling data, and avoided the overlap and saw teeth of streamlines. Through many experiments and 3D simulating, it verified the practicability and feasibility of the new model.

Key words: ocean flow field; streamline tracking; numerical integration; adaptive step; flow-guided algorithm