

基于流线的流场可视化绘制方法综述



张 倩^{1,2} 肖 丽^{2,3}

1 中国工程物理研究院 四川 绵阳 621900

2 北京应用物理与计算数学研究所 北京 100080

3 中物院高性能数值模拟软件中心 北京 100088

(zhangqian18@gscaep.ac.cn)

摘 要 流场可视化是科学计算可视化中一个重要的分支,主要对计算流体动力学的模拟计算结果进行可视化,给研究人员提供视觉上直观可见的图形图像,方便研究人员进行分析。流场可视化的已知技术包括基于几何的方法(如流线和粒子追踪法)以及基于纹理的方法(如 LIC、噪声点、IBFV 等)。流线可视化是流场可视化的一个重要且常用的几何可视化手段。在流线可视化的研究中,流线的放置是整个流线可视化的重点,流线的数目和位置影响了整个可视化效果。当流线放置过多时,会造成视觉的杂乱;而流线放置过少会使流场信息表达不完整,无法传递完整的信息给领域专家。为了实现对科学数据的精确显示,流线可视化产生了两个重要的研究方向:种子点的放置和流线的约减。文中介绍了种子点放置方法和流线的约减方法的相关研究,总结了在 2D 和 3D 流场上出现的一些问题和采取的解决方案,并针对日益增长的科学数据,提出流线可视化下一步需要解决的问题。

关键词: 流线放置;种子点生成策略;流线约减;流场可视化;科学计算可视化

中图法分类号 TP391.41

Review of Visualization Drawing Methods of Flow Field Based on Streamlines

ZHANG Qian^{1,2} and XIAO Li^{2,3}

1 China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

2 Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100080, China

3 CAEP Software Center for High Performance Numerical Simulation, Beijing 100088, China

Abstract Flow visualization is an important branch of scientific computational visualization. It mainly visualizes the simulation calculation results of computational fluid dynamics, and provides researchers with visually intuitive graphical images to facilitate researchers' analysis. The known techniques for flow visualization include geometric-based methods; such as streamline, particle tracking methods; and texture-based methods; LIC, spot noise and IBFV. Streamline visualization is an important and commonly used geometric visualization method for flow field visualization. In the study of streamline visualization, the placement of streamline is the focus of the entire streamline visualization, and the number and position of streamline affect the entire visualization effect. When too many streamlines are placed, it will cause visual clutter, and too little cause the flow field information to be incompletely expressed and cannot be transmitted to domain experts. In order to achieve accurate display of scientific data, streamline visualization has generated two important research directions: placement of seed points and reduction of streamline. This article introduces the related research of seed point placement method and streamline reduction method, summarizes some problems and solutions adopted in 2D and 3D flow fields, and proposes the need for streamline visualization in view of the growing scientific data in the future.

Keywords Streamline placement, Seeding strategy, Streamline reduction, Flow visualization, Scientific visualization

1 引言

计算机和计算方法的飞速发展把科学与工程计算推向人类科学研究和工程设计活动的前沿,科学与工程计算已成为

与实验、理论相并列的主要手段。在科学与工程计算中,流体动力学^[1]数值模拟是重要分支之一。流体动力学数值模拟在国防装备、工业生产、社会生活和生命科学等方面都有极为重要的应用,如图 1 所示。例如,在交通运输方面,流体动力学

到稿日期:2020-12-14 返修日期:2021-05-19 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0202203)

This work was supported by the National Key Research and Development Project of China(2017YFB0202203).

通信作者:肖丽(xiaoli@iapcm.ac.cn)

数值模拟已广泛应用于飞机、汽车、高铁等运输工具的气动性能分析与设计^[2]；在航空航天方面，流体动力学数值模拟在航空发动机和燃气轮机的燃烧性能分析中发挥着重要作用；在生命科学中，人体内的血液流动^[3]是典型的流体动力学问题；在生态环境和气候方面的大气环流和海洋环流，以及在大型能源装置中，核反应堆研制中的热工水力等问题，都是典型的流体动力学问题。流体动力学数值模拟产生了大量的场数据，这些数据中蕴含着复杂的流动物理特征。研究表明，图形图像是人类接受信息最快速、最直观的方法。流场可视化的主要任务就是将上述复杂的模拟数据转换成直观的可视图像，同时借助人机交互的手段，帮助科研人员高效地分析和理解复杂流动中的物理现象，洞察海量数据中蕴含的复杂物理规律^[2]。

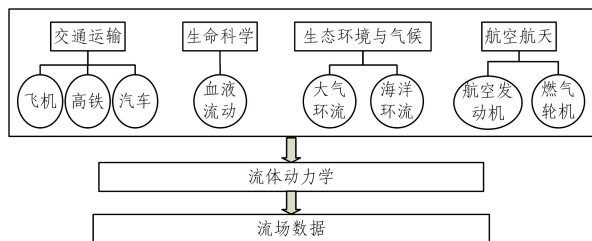


图1 流体动力学在各个方面的应用

Fig. 1 Fluid dynamics applications in all aspects

20 世纪 80 年代初，流场可视化开始得到政府有关部门、工业及科学界的重视，许多科学计算可视化的研究人员积极投入流场可视化理论、技术、方法以及应用的工作中^[2]。几十年来已经形成了较为完备的理论和方法。对于流场数据，按照数据类型可以分成标量、矢量^[4]和张量^[5]数据，按照空间维度可以分为零维的点数据、一维的线数据、二维的曲面数据和三维的体数据^[6]。对于标量的数据，根据空间维数的不同，可以分成等值线^[7]和等值面^[8]的方法；对于矢量数据，多采用几何图形的方法进行可视化，包括箭标法^[9]、时间序列点法^[10]、矢量线法^[2]、动态图元法^[2]、矢量面法^[2]、矢量体法^[2]等。其中常用的曲线类型包括流线^[11]、迹线^[12]、脉线^[13]等。流线指矢量场的瞬时切线，迹线指粒子的实际轨迹，脉线则是模拟从一个固定点所发射粒子的轨迹。

流线是一条处处与场相切的线^[11]，每个点代表了流线在该点的切线方向，如图 2 所示^[14]。流线可视化具有计算量小、特征突出、便于交互等优点。流线主要有两种构造方法：第一种是基于数值积分^[15]的方法，先确定一个种子点，采用积分的方法在矢量场内部得到固定时间步长下点的位置，将这些点使用线段连接起来，这样得到的流线本质上是折线段；第二种方法是基于流函数的流线生成方法。在实际中，基于数值积分构造的流线计算简单，符合流体计算中的离散思想，成为了主要的流线构造方法。数值积分的方法有很多，较为常用的有一阶欧拉法^[16]、二阶龙格库塔法^[17]和四阶龙格库塔法^[18]。在流线的生成中，种子点的放置是一个重要的研究方向。种子点的数目和位置会影响整个流场的可视化描述，种子点过少或位置过于疏远都可能遗漏某些重要特征；而种

子点过多或位置过近则会带来流线密集，造成视觉上的障碍。图 3 的 3 个对比图显示了不合适的种子点位置会造成特征缺失的结果。

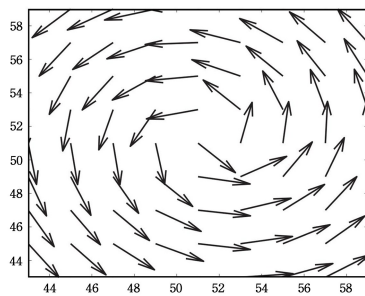


图2 流场内每个点含有一个速度^[14]

Fig. 2 Each point in the flow field has a velocity^[14]

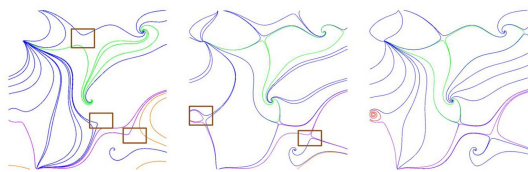


图3 不恰当的种子点放置造成特征的缺失^[19]

Fig. 3 Improper placement of seed points leads to lack of features^[19]

经过二十多年对种子点放置的研究，研究人员认为在 2D 场中一个好的流线可视化方法应该具备以下特征：

(1)覆盖。流场可视化不应该遗漏任何感兴趣的特征，包括临界点^[20]、分离线^[20]、涡^[21]等，需要对整个流场区域特征区域和非特征区域进行绘制。

(2)均匀。均匀的流线放置符合美学原理，观察者更加容易观察流场并发现流场中感兴趣的区域。

(3)连续。长流线是研究过程中追寻的一个重要方向，流线的每个端点都会分散图像的视觉流，使用较少的长流线代替较多的短流线是提升视觉效果的一个重要手段。同时，流线的终止一般和临界点、边界域等特殊地方有关，过多的短流线还会造成感知上的紊乱。

上述的 3 个准则并不能同时达到完美的境界，需要对 3 个准则进行取舍。在覆盖和均匀的原则上，覆盖要求尽可能地对整个流场都生成流线，但流线过多会造成杂乱，而杂乱的结果与均匀的原则产生矛盾。在连续和均匀的原则上，较长的流线可能存在多个流线端点聚集在一起的情况，会导致流线之间密度不一样，与均匀的原则相背离。在考虑种子点放置时，3 个原则都需要考虑并且需要进行平衡。

在 3D 场中，考虑到 2D 和 3D 流场在绘制之间的差距，以及种子点放置方法在 2D 和 3D 空间之间的可适用性，研究的重点从种子点放置向流线约减方向改变。一般准则是在保证流场特征不丢失的情况下，减少流线之间的遮挡问题。与 2D 场相比，3D 场更加需要解决遮挡问题。

本文第 2 节给出了从 1996 年到目前所提出的种子点放置方法；第 3 节给出了对 2D 和 3D 流场下存在的流线杂乱问题进行研究的流线约减方法；第 4 节提出了基于流线的流场可视化研究方向的展望；最后总结全文。

2 种子点放置方法

在流场可视化中,种子点放置是整个可视化的第一步,它奠定了整个流场绘制的场景。对于一个流场可视化效果的好坏,种子点的放置是一个重要的评判方向。优秀的种子点放置方法可以达到覆盖整个流场并产生长而均匀的流线的目的,同时还能减少后期对于绘制结果的处理。在早期的研究中,采取的是规则网格撒点、随机撒点和用户指定位置撒点的方法。规则网格撒点和用户指定位置撒点要求研究者需要具有一定的流场研究经验。随机的种子点放置方法利用一个简单的随机模型,可以在一个规定大小的场内放置种子点,这种方法简单易实现,可以构造出场的基本轮廓。但是该方法对流场的绘制容易出现信息遗漏的问题,同时还会产生生成众多的短流线、流线间距离差距较大进而传达出错误的信息以及无法对感兴趣的区域进行着重描述等缺点。自1996年开始研究种子点的放置方法,经过二十多年的研究,种子点的放置方法大致可以分为以下几类:图像引导的放置方法、均匀流线放置方法、最近距离种子点放置方法、基于特征的种子点放置方法、基于信息论的种子点放置方法。

2.1 图像引导的放置方法

Turk等^[22]最早开始研究种子点方法,目的是产生均匀的长流线。在研究开始之前,流场可视化采用的一般是矢量图^[2],矢量图得到的是流线段(非常短的流线),在观察流场时,通过视觉上将相邻线段的两个接近的端点连接起来进行猜测。矢量图可能造成视觉上的错觉,而不均匀的密度会导致对流场数据的忽视。Turk等从产生的图像效果入手,提出了基于图像的种子点放置方法。首先使用规则场放置法或者随机生成种子点的方法生成多条流线段,对于产生的图像,使用一个能量函数方法对图像进行能量计算,以产生均匀的流线。能量函数使用图像的低通滤波来测量当前图像和期望的视觉密度之间的差异,能量函数越小,流线越均匀。为了产生均匀的流线段,需要让流线段向随机方向移动一小段距离,然后重新计算图像的能量值,如果能量值更小,移动合法并且用新的流线段代替原来的流线段,当能量值达到用户的阈值之后,结束流线段的移动。在上面的步骤结束之后,产生了均匀的短流线段。对这些流线段定义一系列的操作:改变种子点的位置,插入新的流线,删除已有流线,继续向前或向后积分以增长流线条长度,沿向前或向后积分缩短流线条长度,将端点足够靠近的两条流线合并成一条。对流线段进行上述操作,如果得到的图像能量值降低,则认为这个操作合法,使用这个操作。当所有的操作都不能降低图像能量时,算法终止。

与随机生成的流线段相比,Turk等的方法产生了高质量的流线。均匀的流线提高了视觉对图像内容的抓取能力,长流线会减少多个端点对图像的分散感,提高图像的可视效果。此外,这种方法还可以应用于彩色图片,制作出非真实感的手绘效果^[23]。图4显示了梨的手绘效果图。但是该算法中对每条流线段进行操作计算图像能量值的贪心思想增大了计算代价,每次进行流线的调整都需要重新计算场的能量值,其计

算速度和绘制质量之间需要进行进一步取舍。之后,Mao等^[24]将这个思想拓展到曲线网格表面流场的流线放置。Li等^[25]将这个方法拓展到3D流场上,利用2D深度图在图像空间进行种子点均匀放置生成3D流场图像。

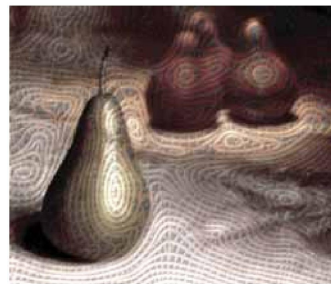


图4 Turk等方法绘制的具有手绘效果的梨^[22]

Fig. 4 Pear with hand-drawn effect by Turk^[22]

2.2 均匀流线放置方法

基于图像引导的种子点放置法,从图像效果出发,产生了均匀的长流线,但是基于图像的计算消耗巨大,与快速进行用户交互的要求相背离并且不适用于密集场图像。Jobard等^[26]从流场入手,用户设置流线距离来控制均匀流线的生成。首先放置一个种子点,生成一条流线,将这条流线采样得到的点使用队列存储,新的种子点从当前已有的流线附近产生,当新种子点有效时,将这个种子点产生的流线放入队列。直到队列为空,算法结束。

与基于图像的种子点放置方法相比,在产生流线间分离距离为6%和1.5%的情况下,Turk等的方法需要2 min和10 min,Jobard等的方法需要4 s和17 s。这两种方法都能产生长而均匀的流线和手绘风格的图像,但后者在效率和质量之间进行了良好的平衡,大大减少了计算时间。Jobard等将均匀流线放置方法引入多分辨率流场可视化^[27]和非稳定流场^[28]。在流场特征(涡等)比较多的情况下,均匀流线放置方法在特征附近容易产生比较大的空腔和短流线,存在对特征描述不完整的情况,Liu等^[29]使用双队列方法对拓扑播种进行优先排序,减少特征附近的短流线条数目并采用方差的自适应距离控制法减少空腔。上述两种方法得到的流线效果如图5所示,其中流线间距为1.5%。

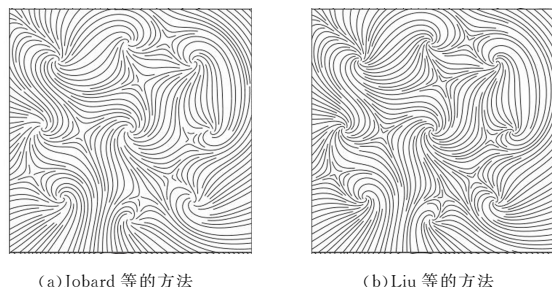


图5 在300×300的流场上流线间距为1.5%时两种算法的效果图^[29]

Fig. 5 Images of two algorithms when spacing of streamlines in 300×300 flow field is 1.5%^[29]

与Jobard等的方法相比,Liu等的方法在流线间密度分别为1.0%,1.5%,2.0%的情况下,速度分别是前者的7.81

倍、9.87 倍、14.28 倍。在保证放置流线质量的前提下,Liu 等的方法极大地加快了流线的生成。相关研究者也进行了更多的流线均匀生成的研究^[30-33]。

随后研究者提出的种子点放置方法大都在满足流线均匀放置的要求下,对其他方面进行了改进。均匀控制网格被引入流线的生成中,通过控制种子点在网格中的位置,可以产生均匀的流线。根据网格大小的不同可以得到不同的流线密度。均匀的放置方法在湍流结构较少的地方有不错的表现;但是对于湍流较多的区域,产生的流线往往比较复杂,难以达到均匀可视的目的。

2.3 最远距离种子点放置方法

与侧重生成均匀流线不同,Mebarki 等^[34]更加注重生成长流线。因此,文献[34]提出了最远距离放置方法。为了保证长流线的生成,首先提出在流场中心放置种子点,生成一条流线(本质上是众多的折线段),然后对场内流线经过的点和边界点构造 Delaunay 三角形^[35],对三角形外接圆的直径进行筛选,将小于给定值的圆去除,将大于给定值的圆按照直径排序放入优先序列中,将最大外接圆的圆心作为下一个种子点的放置点。

最远距离种子点放置方法在速度上比 Turk 等的方法快了近 200 倍。从本质上来看,最远距离放置流线更加有利于长流线的生成,且所有的流线都有机会使自己尽可能地长,但是对最远距离的计算采用的是一种近似的方法,在准确性上有待提高;此外,该方法需要大量构造 Delaunay 三角形,从编码使用的角度来看较为烦琐。随着后期对自适应网格的使用,Mebarki 等在该算法内使用自适应网格代替 Delaunay 三角形控制最远距离^[36],使算法底层数据结构更加简单通用。图 6 给出了 Turk 等、Jobard 等以及 Mebarki 等的方法对于同一个流场数据的可视化效果。

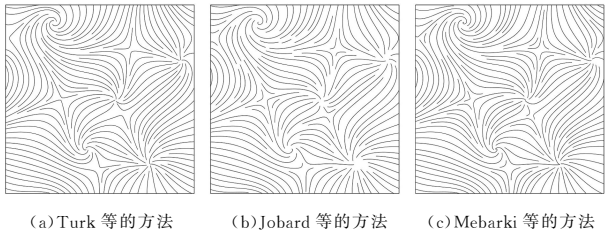


图 6 对于同一个流场数据,3 种方法产生的分离距离为 1.68% 的可视化结果^[34]

Fig. 6 Three methods produced visualizations with a separation distance of 1.68% on the same dataset^[34]

2.4 基于特征的种子点放置方法

流场可视化的主要目的是为领域专家提供直观可视的图像进行分析。流场特征是领域专家感兴趣的区域,为了突出流场特征,Verma 等^[37]提出了基于特征区域进行种子点放置的方法。在流体力学中,特征在临界点附近。临界点是流场中消失的点,即大小为 0 的点。Verma 等找到临界点,将临界点按照周围点的表现进行分类,并对每种特征类型设置种子点模板,突出刻画特征,对于没有特征的区域,进行随机放置种子点的方法。图 7 给出了在 2D 场中存在的临界点类型。

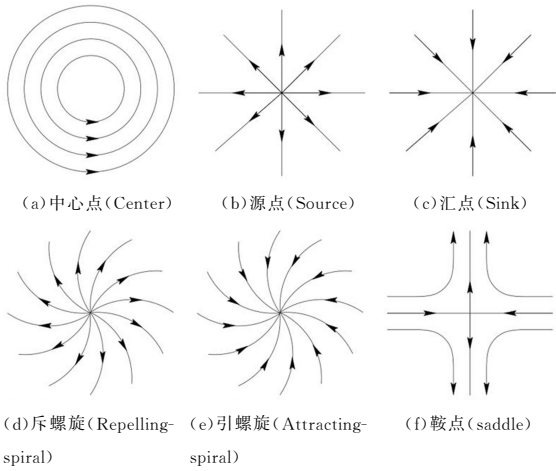


图 7 在 2D 场中可能存在的不同临界点类型^[37]
Fig. 7 Different types of critical points possible in 2D flows^[37]

Verma 等的方法突出了特征区域,对特征有更加着重的描述,不会遗漏特征附近的流线。其对于湍流较多的区域刻画效果显著,但是未能有效控制流线之间的密度,在流线均匀生成的原则上存在问题。越来越多的研究者开始注意在保证特征突出的同时,生成均匀的流线^[38-40]。Qin 等^[41]提出在 2D 场中保证流场特征的同时,引入均匀网格来控制流场的流线密度的方法,以保证流场的均匀分布。除了使用临界点作为特征的标志,矢量的大小和流线的相干性也可以作为特征^[42-44]。Ye 等^[45]将 Verma 的思想从 2D 流场带入到 3D 流场中,构造了基于特征的 3D 流场可视化方法。由于 3D 场比 2D 场更加复杂,产生的流线数量更多以及流线之间遮挡更加严重,因此 3D 流场对于流场特征的描述更加注重,在之后对 3D 场的可视化研究中,特征将成为一个关注重点。

2.5 基于信息论的种子点放置方法

基于特征的方法是从流场的物理学和数学性质来考虑特征,Xu 等^[44]从信息论的角度来考虑流场,找到了隐式特征。首先对于整个流场建立相应的香浓熵^[46]场;然后将种子点放在熵场内值较大的区域,生成流线;再根据已经生成的流线生成一个中间向量场,根据原始场和中间场之间的条件熵迭代地在流场中放置更多的流线,当条件熵的减少收敛时,种子点放置结束。

与基于特征的方法相比,信息论可以描述出其中难以被数学方法刻画出的特征,同时在不存在特征的空白区域的刻画效果也比前者好,但是该方法对于可以用数学方法刻画出的特征效果不如基于特征的方法,在生成长流线方面也存在一些问题。Chen 等^[47]提出了一种考虑流线间度量的方法,即将种子点随机放置在队列中,对每个种子点都生成流线,当流线与现有流线的相似距离达到给定的值时,流线停止生成。该方法会导致最先生成的流线长度比后生成的流线长度长,且首先生成的流线可能对整个场而言没有实际意义。Shen 等^[48]提出了使用局部度量来计算原流场和近似场之间的差异以及使用全局度量对流线之间的差异进行度量来决定是否放置种子点。

表 1 是种子点放置方法的比较,其中罗列了 5 种种子点放置方法并比较了各自的优缺点和适用范围。

表 1 种子点放置方法比较

Table 1 Comparison of seed placement methods

种子点放置方法	优点	缺点	适用范围
图像引导的放置方法	能生成长而均匀的流线	计算量巨大,耗时长,用户交互效果较差	2D 适用于与图像有关的流场数据,且提出了一个图像效果的度量准则
均匀流线放置方法	解决了均匀放置的问题,速度快于前者	临界点附近易存在空腔问题,易产生不连续的情况	2D 流场特征较少或特征不影响整体效果
最近距离种子点放置方法	能生成长流线	数据组织结构较复杂	2D 特征较少,长流线较多
基于特征的种子点放置方法	用较少的流线描绘特征,生成的流线少,特征不遗漏	临界点找寻计算复杂且鲁棒性上存在问题	2D/3D 适用于数据量大、特征比较明显、能检测的流场
基于信息论的种子点放置方法	不用显式定义临界点,还能找到不由这些点定义的特征	更多地考虑统计信息,缺少空间信息,且熵的统计结果很大程度上依赖于划分的数目	2D/3D 适用于特征难以用数学方法刻画的复杂流场

3 流线约减方法

在 3D 场中,流线更加复杂,视觉的限制让 3D 场的流结构比 2D 场更难以观察。生成流线之后,流线之间流特征的遮挡问题普遍存在。对于表达信息相似的区域,选择其中部分流线进行显示可以在保留特征的同时减少流线的数目,降低视觉的紊乱。流线的约减可以从大小、位置、方向等众多因素进行考虑。

Zheng 等^[19]考虑到在 2D 场中存在流特征绘制不完整的情况,提出基于特征的流线选择方法。给定一些随机或均匀放置的流线,通过考虑流线的几何特征和信息量来判断各流线的特征类型。将所有流线根据其特征类型和位置进行聚类,从各个类中选择一部分进行显示,实验结果表明该方法可以完整地保留流结构。Marchesin 等^[49]提出了基于视图方法来进行流线约减。首先随机生成流线,然后对熵较低的部分和流线之间遮挡较为严重的地方进行流线剔除,最后在剔除后的空白区域添加新流线。图 8 给出了 Marchesin 等的方法进行流线约减后的效果。Lee 等^[50]也提出了基于视图的算法,其使用香浓熵作为向量场复杂度的测量值并选用最大熵投影来评估和选择流线。Daying 等^[51]提出了基于迭代最近点(ICP)^[52]和 K-means 聚类^[53]的方法,其中 ICP 记录流线的形状和排名,使用排名对初始流线进行聚类,使用空间距离对相似的流线进行修剪。Yu 等^[54]提出将空间上相邻的流线和几何上相似的流线进行分组,形成一个层次结构,并从这些层里面提取流线束,重点突出含有流特征的流线束。Li 等^[55]将机器学习和流特征寻找相结合,并利用支持向量机进行训练,有效提取流特征,达到减少视觉混乱的目的。此外,还有一些研究者进行了相关的研究^[56-58]。

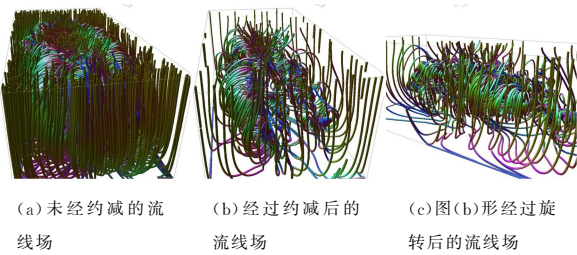


图 8 流线约减效果^[49]

Fig. 8 Streamline reduction effect^[49]

上述约减方法大部分是从信息论或者流线之间相似度、

流线间的位置进行考虑。2D 流场和 3D 流场之间流线相似度判断准则的不完全适用让其中一些优秀的 2D 流线约减方法难以处理 3D 流场。同时,3D 流场产生的流线冗余和相互遮挡的情况比 2D 流场更加严重和复杂。从流场拓扑结构入手,按需求对特征区域和非特征区域使用不同方法去除流线可以成为 3D 流场流线约减的研究方向。

4 流线可视化绘制方法展望

流线可视化一直是科学可视化的一个重要方向。与其他流场可视化技术相比,流线可视化具有计算量小、特征突出、便于交互等优点。经过二十多年的研究,流线可视化在种子点放置和流线约减等方向取得了一定的成果,但是随着模拟计算能力和对流场模拟能力的大大加强,流场数据逐渐向数据量大和数据更复杂的方向发展,现有的研究方法在应对未来的发展趋势上存在着各种各样的问题。一方面,现有方法大都基于均匀网格,在数据量巨大的未来,存储时可能更多地采用非均匀网格或者其他网格,存在与现有方法不匹配的问题;另一方面,巨大的数据量可能导致在 2D 屏幕上感兴趣的特征无法完全显示出来,因此多分辨率显示也将成为发展的一个重点。从用户的角度来看,快速交互也是一个新的需求。从算法本身和并行^[59]加速等多个方向看,对大数据进行快速计算并得到高质量的可视化结果将成为未来的研究重点。从种子点放置和流线约减技术本身考虑,在多个准则之间找到一个较完美的平衡来放置流线是需要考虑的问题。

总的来说,未来流线可视化技术可以考虑以下几个方面:

- (1)制定对流线放置的评判标准。基于评判标准和基本原则,研究者可以更多地针对其中一个或者几个方面入手,寻找新的种子点放置和约减方法,此外,也可以在原有的放置方法上进行改进。
- (2)可以将原有的方法扩展到非均匀网格上。对原有的技术进行一些研究和改进,使其适应新的结构。
- (3)研究数据量巨大和突出感兴趣部分的放置方法。在流场数据量巨大时,如何在一个小屏幕上清晰地显示整体和局部也是未来的一个研究方向。
- (4)采用更好的加速算法来快速绘制流线。大数据会带来更多的计算量,因此减少计算时间和用户交互时间成为一个研究的方向。并行是一个当前正在考虑的问题,可是流线绘制本身的局限性让并行结果并不理想,从并行的目的着手,提出可以用于并行的种子点放置方法能够同时在种子点放置

和并行上取得一定的成果。

(5)与机器学习和深度学习相结合,深度挖掘流场内数据之间可能存在的联系。

基于以上5个大的方向,流场可视化有望获得更加优秀的可视化效果和更快的绘制速度,以应对大数据下要求更高的流场绘制,以及满足应用领域对交互速度和绘制质量的迫切需求。

结束语 本文对于基于流线的流场可视化中的两个重要问题——种子点放置和流线约减问题的研究方法进行了总结。提出了需要研究人员建立一个通用的评价标准,并从现阶段数据的快速发展对未来可视化的研究方向提出了一些建议。当前,在众多研究者的持续研究下,已建立了一些对流线可视化的研究方法,并在可视化结果上取得了一定的效果,但未来仍然需要对这个方向进行进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] BATCHELOR C K, BATCHELOR G K. An Introduction to Fluid Dynamics[M]. Cambridge University Press, 2000: 46-78.
- [2] LI S K, CAI X, WANG W K, et al. Large-scale Flow Field Scientific Visualization[M]. National Defense Industry Press, 2013: 8-12.
- [3] OELTZE S, LEHMANN D J, KUHN A, et al. Blood Flow Clustering and Applications Invirtual Stenting of Intracranial Aneurysms[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2014, 20(5): 686-701.
- [4] NELSON R C, SAMET H. A Consistent Hierarchical Representation for Vector Data[C]// Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. 1986: 197-206.
- [5] SCHOUTEN J A. Tensor Analysis for Physicists[M]. Courier Corporation, 1989: 32-45.
- [6] LEVOY M. Display of Surfaces from Volume Data [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1988, 8(3): 29-37.
- [7] DOWNING J A. The Automatic Construction of Contour Plots with Applications to Numerical Analysis Research[R]. Texas Univ Austin Computation Center, 1966.
- [8] LAWONN K, GASTEIGER R, PREIM B. Adaptive Surface Visualization of Vessels with Embedded Blood Flow Based on the Suggestive Contour Measure[C]// VMV. 2013: 113-120.
- [9] LFFELMANN H, MROZ L, GRLLER E, et al. Stream Arrows: Enhancing the Use of Stream Surfaces for the Visualization of Dynamical Systems[J]. The Visual Computer, 1997, 8(13): 359-369.
- [10] AGÜI J C, HESSELINK L. Flow Visualization and Numerical Analysis of a Coflowing Jet: a Three-dimensional Approach[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 191: 19-45.
- [11] THIELE M R. Streamline Simulation [C]// 6th International Forum on Reservoir Simulation. Society of Petroleum Engineers; Schloss Fuschl, Austria, 2001: 3-7.
- [12] THEISEL H, WEINKAUF T, HEGE H C, et al. Stream Line and Path Line Oriented Topology for 2D Time-dependent Vector Fields[C]// IEEE Visualization 2004. IEEE, 2004: 321-328.
- [13] MEHRAN R, MOORE B E, SHAH M. A Streakline Representation of Flow in Crowded Scenes[C]// European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2010: 439-452.
- [14] XU L, LEE T Y, SHEN H W. An Information-theoretic Framework for Flow Visualization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2010, 16(6): 1216-1224.
- [15] LI Q Y, WANG N C, YI D Y. Numerical Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 97-132.
- [16] EULER L. Leonhard Euler and the Königsberg Bridges [J]. Scientific American, 1953, 189(1): 66-72.
- [17] WILLIAMSON J H. Low-storage Runge-kutta Schemes [J]. Journal of Computational Physics, 1980, 35(1): 48-56.
- [18] CARPENTER M H, KENNEDY C A, BIJL H, et al. Fourth-order Runge-Kutta Schemes for Fluid Mechanics Applications[J]. Journal of Scientific Computing, 2005, 25(1): 157-194.
- [19] ZHENG L, WANG W, LI S. Feature-based Streamline Selection Method for 2D Flow Fields[C]// 2015 14th International Conference on Computer-Aided Design and Computer Graphics (CAD/Graphics). IEEE, 2015: 129-136.
- [20] HELMAN J L, HESSELINK L. Visualizing Vector Field Topology in Fluid Flows[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1991, 11(3): 36-46.
- [21] LEONARD A. Vortex Methods for Flow Simulation[J]. Journal of Computational Physics, 1980, 37(3): 289-335.
- [22] TURK G, BANKS D. Image-guided Streamline Placement[C]// Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. 1996: 453-460.
- [23] MACIEJEWSKI R, ISENBERG T, ANDREWS W M, et al. Measuring Stipple Aesthetics in Hand-drawn and Computer-generated Images[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2008, 28(2): 62-74.
- [24] MAO X, HATANAKA Y, HIGASHIDA H, et al. Image-guided Streamline Placement on Curvilinear Grid Surfaces[C]// Proceedings Visualization'98 (Cat. No. 98CB36276). IEEE, 1998: 135-142.
- [25] LI L, SHEN H W. Image-based Streamline Generation and Rendering[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(3): 630-640.
- [26] JOBARD B, LEFER W. Creating Evenly-spaced Streamlines of Arbitrary Density[M]// Visualization in Scientific Computing'97. Springer, Vienna, 1997: 43-55.
- [27] JOBARD B, LEFER W. Multiresolution Flow Visualization[J]. Journal of WSCG, 2001, 9(3): 34-35.
- [28] JOBARD B, LEFER W. Unsteady Flow Visualization by Animating Evenly-spaced Streamlines[C]// Computer Graphics Forum. Oxford, UK and Boston, USA: Blackwell Publishers Ltd, 2000: 31-39.
- [29] LIU Z, MOORHEAD R, GRONER J. An Advanced Evenly-spaced Streamline Placement Algorithm[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(5): 965-972.
- [30] SPENCER B, LARAMEE R S, CHEN G, et al. Evenly Spaced Streamlines for Surfaces: An Image-based Approach[C]// Computer Graphics Forum. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2009: 1618-1631.

- [31] LIU Z, MOORHEAD II R J. Robust Loop Detection for Interactively Placing Evenly Placed Streamlines[J]. Computing in Science & Engineering, 2007, 9(4): 86-91.
- [32] LIU Z, MOORHEAD II R J. Interactive View-driven Evenly Spaced Streamline Placement[C]// Visualization and Data Analysis 2008. International Society for Optics and Photonics, 2008: 68090A.
- [33] ZHANG W, WANG Y, ZHAN J, et al. Parallel Streamline Placement for 2d Flow Fields[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 19(7): 1185-1198.
- [34] MEBARKI A, ALLIEZ P, DEVILLERS O. Farthest Point Seeding for Efficient Placement of Streamlines[C]// VIS 05, IEEE Visualization, 2005. IEEE, 2005: 479-486.
- [35] SHEWCHUK J R. Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator[C]// Workshop on Applied Computational Geometry. Berlin: Springer, 1996: 203-222.
- [36] MEBARKI A. Adaptive Distance Grid Based Algorithm for Farthest Point Seeding Streamline Placement[J]. Open Computer Science, 2016, 6(1): 91-99.
- [37] VERMA V, KAO D, PANG A. A Flow-guided Streamline Seeding Strategy[C]// Proceedings Visualization 2000, VIS 2000 (Cat. No. 00CH37145). IEEE, 2000: 163-170.
- [38] WU K, LIU Z, ZHANG S, et al. Topology-aware Evenly Spaced Streamline Placement[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 16(5): 791-801.
- [39] ZHANG W, DENG J. Topology-driven Streamline Seeding for 2D Vector Field Visualization[C]// 2009 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. IEEE, 2009: 4901-4905.
- [40] ZHANG W, SUN B, WANG Y. A Streamline Placement Method Highlighting Flow Field Topology[C]// 2010 International Conference on Computational Intelligence and Security. IEEE, 2010: 238-242.
- [41] QIN X, CHEN X, CHEN L, et al. Streamline Uniform Placement Algorithm With Dynamic Seed Points[J]. IEEE Access, 2019, 7: 113844-113852.
- [42] DING Z, ZHANG X, CHEN W, et al. Coherent streamline generation for 2D vector fields[J]. Tsinghua Science and Technology, 2012, 17(4): 463-470.
- [43] YUSOFF Y A, MOHAMED F, MOKHTAR M K, et al. Magnitude-based Seed Point Placement for Streamlines Generation[C]// 2017 IEEE Conference on Big Data and Analytics (ICBDA). IEEE, 2017: 81-86.
- [44] WANG S, YOU R, CHEN Y, et al. Difference-Contribution Strategy for Seeding 2D Streamlines[C]// WSCG 2010: Communication Papers Proceedings. 2010.
- [45] YE X, KAO D, PANG A. Strategy for Seeding 3D Streamlines[C]// VIS 05, IEEE Visualization, 2005. IEEE, 2005: 471-478.
- [46] SHANNON C E. A Mathematical Theory of Communication[J]. The Bell System Technical Journal, 1948, 27(3): 379-423.
- [47] CHEN Y, COHEN J, KROLIK J. Similarity-guided Streamline Placement with Error Evaluation[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(6): 1448-1455.
- [48] LI L, HSIEH H H, SHEN H W. Illustrative Streamline Placement and Visualization[C]// 2008 IEEE Pacific Visualization Symposium. IEEE, 2008: 79-86.
- [49] MARCHESIN S, CHEN C K, HO C, et al. View-dependent Streamlines for 3D Vector Fields[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2010, 16(6): 1578-1586.
- [50] LEE T Y, MISHCHENKO O, SHEN H W, et al. View Point Evaluation and Streamline Filtering for Flow Visualization[C]// 2011 IEEE Pacific Visualization Symposium. IEEE, 2011: 83-90.
- [51] DAYING L, DENG MING Z, ZHAO QI W. Streamline Selection Algorithm for Three-dimensional Flow Fields[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 25(5): 666-673.
- [52] CHETVERIKOV D, SVIRKO D, STEPANOV D, et al. The Trimmed Iterative Closest Point Algorithm[C]// Object Recognition Supported by User Interaction for Service Robots. IEEE, 2002: 545-548.
- [53] LIKAS A, VLASSIS N, VERBEEK J J. The Global K-means Clustering Algorithm[J]. Pattern Recognition, 2003, 36(2): 451-461.
- [54] YU H, WANG C, SHENE C K, et al. Hierarchical Streamline Bundles[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 18(8): 1353-1367.
- [55] LI Y, WANG C, SHENE C K. Extracting Flow Features Via Supervised Streamline Segmentation[J]. Computers & Graphics, 2015, 52: 79-92.
- [56] MA J, WANG C, SHENE C K. Coherent View-dependent Streamline Selection for Importance-driven Flow Visualization[C]// Visualization and Data Analysis 2013. International Society for Optics and Photonics, 2013: 865407.
- [57] TAO J, MA J, WANG C, et al. A Unified Approach to Streamline Selection and Viewpoint Selection for 3D Flow Visualization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 19(3): 393-406.
- [58] MCLOUGHLIN T, JONES M W, LARAMEE R S, et al. Similarity Measures for Enhancing Interactive Streamline Seeding[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 19(8): 1342-1353.
- [59] CHEN L, FUJISHIRO I. Optimizing Parallel Performance of Streamline Visualization for Large Distributed Flow Datasets[C]// 2008 IEEE Pacific Visualization Symposium. IEEE, 2008: 87-94.



ZHANG Qian, born in 1995, Ph.D. Her main research interest is scientific visualization.



XIAO Li, born in 1971, master supervisor, researcher, is a member of China Computer Federation. Her main research interest is scientific visualization.