

A Survey of Vortex Extraction Algorithms

Lingwei Ye, Wei Feng

Qingdao Branch of Naval Aeronautical Institute, Qingdao Shandong
Email: windnig@163.com

Received: Mar. 1st, 2018; accepted: Mar. 19th, 2018; published: Mar. 27th, 2018

Abstract

Vortex is one of the main characteristics of fluid dynamics and vortex extraction is an important research subject in aeronautical dynamics, oceanography and industrial applications. In this paper, we give a survey on related works on vortex extraction and analyze these works before concluding in the end.

Keywords

Vortex, Vortex Extraction, Vortex Simulation

涡流检测研究概述

叶灵伟, 冯 威

海军航空大学青岛校区, 山东 青岛
Email: windnig@163.com

收稿日期: 2018年3月1日; 录用日期: 2018年3月19日; 发布日期: 2018年3月27日

摘 要

涡流(Vortex)是流体动力学的重要特征之一, 而涡流检测则是航空动力学、海洋学和工业领域的重要研究课题。该文对涡流检测的相关工作进行了较为系统的介绍, 并进行了小结与分析, 从而指出了进一步的研究方向。

关键词

涡流, 涡流检测, 涡流模拟

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

涡流(Vortex)是流体动力学的重要特征之一。在航空动力学中, 涡流直接影响飞机的飞行特性, 因而在设计阶段是必须考虑的因素; 在海洋学中, 涡流的时空演化是科学家解释洋流循环的重要手段; 在工业领域, 如内燃机的整个工作循环中, 缸内始终进行着复杂而又强烈瞬变的涡流(也称湍流)运动; 因而涡流检测(Vortex extraction)是一个重要的研究课题, 它隶属于流可视化中的特征法这一分支。此外, 由于当导体在变化的磁场中或相对于磁场运动时, 其内部会感应出呈漩涡状流动的电流, 涡流检测在电磁学领域衍生出另一研究课题—远场涡流检测。

本文的主要内容安排如下: 第二节介绍涡流检测方面的工作; 第三节是小结与分析; 最后是结束语。

2. 相关工作

目前国内外涡流检测标准大致可以分为三类: 基于点的标准、基于几何曲线的标准和涡流模拟法。

基于点的标准[1] [2]通常假定涡流是一块具有高转速的区域或者存在一个压力极小值点作为涡流核, 根据涡流中单个点或有限领域内采样点的物理属性, 如压力、涡流幅度和螺旋性(helicity)等[1], 从一些采样点的速度矢量或速度梯度张量中计算压力、速度等物理属性; 但是压力最小的那个地方不一定是涡核存在的地方, 它也可能是由流的其它特性所引起的, 常用方法主要有低压方法、高螺旋态方法、正 Q 方法、特征矢量方法、第二大负特征值方法等。这类方法不能提取出所有情况下的涡流, 存在的主要问题是检测不到转速和转幅都比较小的“弱”涡流; 采样点的选择对检测结果影响很大; 漏检和误检率较高; 一阶近似体现出的缺陷也比较明显, 于是 Peikert [2]提出用高阶微分代替一阶微分的改进方法。

基于几何曲线的标准[3]是利用流线或脉线的几何特性——曲率来计算的, 它是建立在围绕一个中心点集的螺旋模式这种直观概念上的, 充分考虑了流的几何或者运动学上的特性, 使用即时的流线来表示漩涡。典型的方法有曲率中心检测法[4]和缠绕角度(winding angle)法。曲率中心检测法计算二维图像中所有采样点的曲率中心, 对于涡流而言, 其周围流线的曲率中心应集中在某一点周围, 占据一个很小的网格, 因而对曲率中心点集进行网格化之后, 设置门限搜索点密度较大的若干峰值网格区域即可。这种方法与基于点的检测标准有一些相似的缺点, 比如检测结果受采样点选取的影响较大, 漏检和误检率较高, 由于流线并不是规则的圆弧, 因而曲率中心的计算也遇到很多实际问题。缠绕角度(winding angle)法选择环绕某一点的流线进行聚类, 根据弯曲的角度和距离设定标准进行涡流检测。优点是克服了基于点的检测标准的缺点, 可检测流速较慢的弱小涡流, 且易于量化计算和评估。在这方面的研究工作中, 比较突出的是 Portela [5]给出了二维情况下涡流检测的数学框架, 对应于以某一空间点集为中心的旋绕运动; 并引入微分几何中的 winding-angle 概念和 Jordan 结构定义了中心点集和旋绕运动的几何性质。另外, 虽然涡流区域具有 Galilean 不变性[6], 但大多数提取涡流核的方法依赖于参考帧, 只有文献[6]通过提取涡流区域的脊线和谷线来检测涡流核脱离了参考帧的限制。

上面介绍的方法都是以数学方法表示的流场特征来进行涡流检测的, 在噪声存在的情况下往往不稳定, 于是出现了一些涡流模拟方法[7]: 模板匹配法通过计算流场与设计的模板的最大相似值来提取流场的特征点, 这种方法减少了数学计算的过程, 并把卷积应用到流场的模板匹配中, 缺点是对噪声敏感;

连续涡流模拟法(coherent vortex simulation, 简称 CVS) [8]通过小波变换将流分解为有组织结构的涡流和准高斯白噪声两部分, 然后根据多尺度下正交小波系数的方差设置门限进行过滤来进行涡流提取; 文献 [9]将涡流检测分解为两个部分: 涡流核提取和涡流壳提取, 前者基于 Sperner 引理对三角网格顶点的速度矢量方向进行标记, 从而发现最可能包含关键点的三角网格, 后者是结合三角细分方法记录涡流壳周围的流线交点的数目和位置, 同时起到验证前者检测结果的作用, 该方法中的尺度参数有利于发展交互式的涡流检测方法。具体的数值模拟可以分为三种[7]: 一种是雷诺时均方法, 以雷诺平均运动方程和脉动方程为基础, 根据理论分析和实践经验设定假设条件来封闭雷诺平均方程, 从而建立一组描写湍流平均量的封闭方程组的理论计算方法, 这里使用最经典的是 $k-\varepsilon$ 模型和代数应力模型(ASM); 直接数值模拟(DNS)通过十分精细的网格直接求解控制涡流运动的三维非定常 Navier-Stoke 方程组, 计算出所有尺度内的瞬时量, 获得完整的流场信息, 可以计算出涡流中的最小尺度涡, 虽可准确描述, 但巨大的存储和计算量是现有计算机难以承受的; 大涡模拟方法用瞬时的雷诺方程直接模拟涡流中的大尺度涡, 而小涡对大涡的影响通过近似的模型来考虑, 称为亚网格应力尺度模型[7]。这三种方法中, 直接数值模拟是最完备的方法, 仅有两个缺点: 计算量巨大而且只适用于较低雷诺数; 雷诺时均方法计算的是平均值, 运算量小, 缺点是受模型影响大, 仅适用于高雷诺数; 大涡模拟法各方面性能居中, 作为直接数值模拟方法的过渡, 利用大涡模拟方法可以得到表征涡流主要结构的速度场, 能够较真实准确反映涡流的连续运动和发展。

3. 小结与分析

上述三类方法中, 前两类是属于在不同的发展阶段研究出来的方法, 其中基于点的检测属于早期的传统方法, 而基于几何曲线的标准是在流可视化技术进步的基础上提出的。涡流模拟法则是在不同的应用领域发展起来的方法, 与具体应用结合得比较紧密。虽然涡流检测已经取得了一些进展, 然而由于目前对于涡流还没有统一的定义, 给研究工作带来很大困难。这方面目前只有 Roth Martin [10]对现有研究文献中涡流的定义作了比较和分析, 但是仍没有给出一个统一的定义, 所以说涡流检测仍有一些基础理论问题需要解决。另外, 基于几何曲线的检测标准中, 缠绕角度法是一种比较有前途的方法, 对这一方法的改进和扩展有很多方面值得研究, 比如: 1) 将流线上的关键点融入缠绕角度法之中, 从而只对关键点附近的流线进行跟踪, 避免全局搜索; 2) 将此法扩展到三维空间, 但是需将曲线扩展为曲面, 这中间有很多问题需要解决, 绝非易事; 3) 椭圆检测、空域匹配和时域跟踪都是涡流检测过程中经常用到的技术, 如何结合实际应用改进和提高这些技术同样需要进一步的研究。

参考文献

- [1] Banks, D.C. and Singer, B.A. (1995) A Predictor-Corrector Technique for Visualizing Unsteady Flow. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **1**, 151-163. <https://doi.org/10.1109/2945.468404>
- [2] Roth, M. and Peikert, R. (1998) A Higher-Order Method for Finding Vortex Core Lines. *Proceedings of the Conference on Visualization'98*, Research Triangle Park, NC, 18-23 October 1998, 143-150.
- [3] 张彦召. 基于三维可视化技术的流域仿真模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [4] de Leeuw, W.C. and Post, F.H. (1997) A Statistical View on Vector Fields. In: Göbel, M., Müller, H. and Portela, L.M., Eds., *On the Identification and Classification of Vortices*, Stanford University, School of Mechanical Engineering, Stanford, 216-225.
- [5] Sahner, J., Weinkauff, T. and Hege Galilean, H.-C. (2005) Galilean Invariant Extraction and Iconic Representation of Vortex Core Lines. *Proceedings of Eurographics, IEEE VGTC Symposium on Visualization (EuroVis'05)*, IEEE Computer Society, Leeds, UK, 151-160.
- [6] 周磊. 大涡模拟在燃油喷雾过程及多孔介质发动机中应用的研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2010.

- [7] Kai, S., Marie, F., Alexandre, A. and Jörg, Z. (2006) Coherent Vortex Extraction and Simulation of 2D Isotropic Turbulence. *Journal of Turbulence*, **7**, 1-24.
- [8] Xie, C., Xing, L.H., Liu, C.N. and Li, X.C. (2010) Multi-Scale Vortex Extraction of Ocean Flow. *Visual Information Communication*. Springer, Washington DC, 173-183.
- [9] Martin, R. (2000) Automatic Extraction of Vortex Core Lines and Other Line-Type Features for Scientific Visualization. *Selected Readings in Vision and Graphics*, Vol. 9, Hartung-Gorre Verlag, Konstanz.
- [10] Ma, K.L. and Zheng Z.C. (1994) 3D Visualization of Unsteady 2D Airplane Wake Vortices. *Proceedings of the Conference on Visualization'94*, Los Alamitos, CA, 17-21 October 1994, 124-131.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2328-0557, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: ijfd@hanspub.org