

中图法分类号: TP301.6 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)06-1121-06

论文索引信息: 沈恩亚, 曾亮, 徐华勋, 李思昆. 基于交互模糊特征提取的3维流场可视化研究 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(6): 1121-1126

基于交互模糊特征提取的3维流场可视化研究

沈恩亚, 曾亮, 徐华勋, 李思昆

(国防科技大学计算机学院, 长沙 410073)

摘要: 特征可视化方法具有简化复杂流场表示、突出流场特征的特点, 在复杂流场可视化中具有重要作用。传统特征可视化方法通常采用自动化提取方法, 不能有效结合用户知识与经验, 无法满足用户的交互需求。考虑复杂流场特征区域精确界定的困难, 提出一种交互式模糊特征提取算法, 实现了对流场特征的交互式提取与可视化。首先基于模糊理论, 给出了3维流场特征的模糊描述模型, 然后交互式模糊特征提取算法与实现。应用所开发的交互式模糊特征提取可视化系统证明, 它不仅可以充分发挥用户优势, 有效提取数据特征, 适时获取对象特征, 还可以有效表现数据集客观不确定性的本质。

关键词: 交互式模糊特征提取算法; 人机交互技术; 交互式可视分析

Fuzzy-based interactive feature description and extraction of 3D flows

Shen Enya, Zeng Liang, Xu Huaxun, Li Sikun

(College of Computer Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073 China)

Abstract: Feature visualization plays an important role in visualization of complicated flows because it can highlight the feature of the flows with a simplified representation. Traditional feature visualization methods usually employ the semi-automatic technique. The user's interactive requirements can hardly to be met due to the weakness for integrating the user's knowledge and experience. Because of the difficulties with extracting the strict confines of a feature, this paper presents an interactive fuzzy feature extraction algorithm, and has realized interactive extraction and visualization of the flow features. Firstly, construct a model describing the flow features based on the fuzzy theory. Secondly, we implement the algorithm based on the syntax standard. We have developed a visualization system based on the presented interactive fuzzy feature extraction method. The experimental results show that our method can not only make full use of the knowledge and experience of the user to extract the features of the data and the objects on demand but also reflect the uncertainty nature of the data.

Keywords: interactive fuzzy feature extraction algorithm; human-computer interaction technology; interactive visual analysis

0 引言

在计算流体力学(CFD)领域, 随着数值模拟与高性能计算技术的快速发展, 3维流场可视化技术

处理的数据规模越来越大, 数据所包含的特征也越来越复杂, 使3维流场可视化面临许多的技术挑战。3维流场特征可视化是提取复杂3维流场数据中用户关注的物理特征(FOI, feature of Interest)并进行显示的可视化技术。由于特征可视化可以清晰、高

收稿日期: 2010-10-26; 修回日期: 2011-01-29

基金项目: 国家重点基础研究计划(973)项目(2009CB723803); 国家自然科学基金资助项目(60873120)。

第一作者简介: 沈恩亚(1985—), 男, 国防科技大学计算机科学与技术专业硕士研究生, 研究方向为科学计算可视化。

E-mail: shenenya_nudt@gmail.com。

效地显示所提取的典型物理特征,已成为研究人员诊断与分析复杂流场计算模型和物理规律的重要可视化手段。

3 维流场特征可视化主要包括特征描述、特征提取、特征绘制等核心技术。特征可视化应用系统普遍采用交互式的流场特征可视化,从而可以结合研究人员和工程人员的知识和经验。实际的 3 维流场典型物理特征具有不确定性,已有的主流商品化流场特征可视化软件 Tecplot 和 EnSight 等多采用传统的菜单式交互方式和确定的特征提取算法,难以保证对具有不确定性流场特征提取的准确性和有效性。近年来,人们已研究提出几种针对流场物理特征不确定性的特征提取方法。Burger 和 Muigg 等人^[1]将多个传统的涡核提取方法集中到一个通用的框架,允许用户针对具体问题分析如何让这些传统的方法实现互补,为了显示涡核检测结果的不确定性,他们针对所选择的区域利用透明度编码和直接体绘制的方法进行绘制。Doleisch 和 Gasser 等人^[2-3]提出一种简易的特征定义语言 FDL,并结合多种交互手段开发了 SimVis 可视化系统,虽然所提供的逻辑操作可以组合表示复杂的流场物理特征,但是在特征提取过程中无法表示特征属性的重要程度和特征隶属度信息,容易导致局部特征错误显示。

在课题组已提出的基于模糊聚类的模糊特征提取算法 FRFE^[4]基础上,提出交互式模糊特征提取算法(IFRFE),开发一个基于交互式模糊特征提取算法的 3 维流场特征粒子可视化系统。试验结果验证了所提出的交互式特征提取方法在 3 维流场不确定性物理特征描述和提取可视化中的准确性、有效性和实用性。

1 交互式模糊特征提取算法

3 维流场特征具有两个方面的含义^[5]:1) 矢量场中有意义物理现象(如涡流、湍流、激波等)的形状、结构、变化和现象;2) 从数据场中分离出来的用户感兴趣的区域。3 维流场特征结构通常比较复杂,特征区域难以精确界定,缺乏一致有效的统一描述。模糊理论对于复杂现象与结构具有较强的描述能力,下面首先基于模糊理论给出交互式模糊特征提取算法。

1.1 算法流程

特征提取过程计算特征属性是特征提取的基

础,为了算法流水线不同阶段负载平衡,我们把特征属性的计算与隶属度计算分离开来,特征属性的计算在获取数据阶段进行,如图 1 所示。

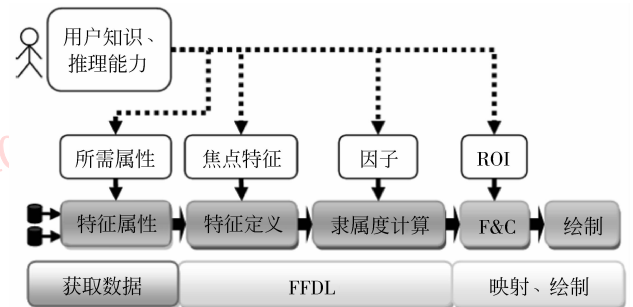


图 1 交互式模糊特征提取算法流程

Fig. 1 Fuzzy-based interactive feature extraction algorithm

1) 预处理

读入数据:获取原始数据后,根据特征提取的需要提取部分数据属性,包括位置、速度、压强等信息,以此降低 IO 负担。

计算特征属性:计算流场基本属性,用于计算提取规则。例如,预计算速度梯度张量后,可以用于计算 λ_2 特征值。

2) 特征计算

特征定义:由用户交互定义特征对象(焦点特征),例如,选择提取涡核、涡区。

隶属度计算:根据用户选定的特征,提供适当的提取规则,用户可以自由设定提取规则具体方法、比例因子以及模糊算子;然后根据模糊测度计算规则计算粒子隶属度信息。

3) 绘制特征

映射、绘制:根据隶属度计算粒子颜色值、透明度等,然后绘制。用户不仅可以定义所需属性、选定所关注的特征,还可以选择关注区域(ROI)。

1.2 模糊特征描述语言 FFDL

流场的属性描述基本可以分为 3 类:基本属性 Φ 、衍生属性 Y 与关联属性 Π 。基本属性 Φ 主要包括空间变量 $x \in \mathbf{R}^3$ (\mathbf{R}^3 表示空间 3 维坐标系)以及速度变量 v ,描述了 3 维流场的基本性质即空间性和方向性。衍生属性 Y 指可以根据属性计算推导得到的属性,例如旋度、速度梯度张量等,文献[1]总结了常用的衍生属性。关联属性 Π 指除了基本属性之外数据集所包含的数据属性,通常包括温度、压力以及密度等,它与具体数据集密切相关,例如,气象数据通常包含压力信息。

FFDL 基本框架如下所示:

```
< DataSource > : Reference to Data
< FeatureSets > : < Features > +
  < Features > : < ExtractRules > with < ProportionRations > +
    < ExtractRules > : Extract Rule with Logic Operation
    < ProportionRation > : // the Importance of the
      //Rule in Consideration
    .....
  < Fuzzy Operators > : Concentrator and(or) Diffusor
</ Features > : End of Features
.....
</ FeatureSets > : End of FeatureSets
.....
```

数据源 (DataSource) 提供所要处理的数据集,支持多种数据格式(例如. raw, . ply, . plt)和多个数据文件(如多时间步数据)。

特征集 (FeatureSets) 多个特征组成的集合。

特征 (Features) 用户所关注的属性或结构。特征是特征集的基本单位,即特征集由多个特征组合而成。

提取规则 (ExtractRule) 用于提取特征的条件。具体实例参考 1.3 节。

模糊算子 (FuzzyOperator) 包括集中算子以及散漫算子。

在实际实现过程中,为了体现提取规则在特征提取过程中所占比重信息,引入比例因子:

比例因子 (ProportionRation) 提取规则在特征提取中所占比重,体现提取规则重要性信息。

FFDL 应用描述 计算数据点隶属度信息主要有 3 种思路:1) 自动计算隶属度,等价于原模糊特征提取算法;2) 交互计算隶属度,我们主要基于这个思路实现;3) 自动计算所得隶属度作为交互式模糊特征提取的参考值。以涡核涡区为例,作为 CFD 中所关注的重要特征之一,逻辑谓词为用户提供多种选择,针对具体数据源,用户可以自定义特征,不仅可以显示属性组合特征,如数据集中高压低速区,也可以在多个特征之间通过逻辑谓词 \neg, \wedge, \vee 显示组合特征。如下给出了本文实现的涡区提取 FFDL 原型:

```
< DataSource > D: \\project \\data \\spacecraft1 \\14000_flow-
  UVW.raw
< FeatureSets > Vortex
  < Feature > VortexRegion
```

```
< LogicOperation > AND
  < ExtractRule > VelocityER
  < ProportionRation > VelocityPR
  < ExtractRule > StreamlineDistanceER
  < ProportionRation > StreamlineDistancePR
  < ExtractRule > Lambda2ER
  < ProportionRation > Lambda2PR
  < ExtractRule > PressureER
  < ProportionRation > PressurePR
  < ExtractRule > TemperatureER
  < ProportionRation > TemperaturePR
</ LogicOperation >
< FuzzyOperators >
  < DiffuseOperator > VR DiffuseOperator
  < ConcentrateOperator > VR
    ConcentrateOperator
</ FuzzyOperators >
</ Feature >
</ FeatureSets >
```

首先,根据位置和速度等基本属性计算临界点(源点、汇点和鞍型点),之后利用提取规则计算隶属度数据点隶属度,以返回舱数据为例,包括 5 个提取规则:速度(基本属性提取规则)、流线距离和 λ_2 (衍生属性提取规则)、压强和温度(关联属性提取规则),每个规则之后为相应的比例因子。研究人员依据自身的知识、经验和应用需求自由选择定义提取规则和对对应的重要性,获取所需特征数据信息。

为了进一步提高算法计算效率,如果硬件条件允许,用户可以选择在 GPU 上计算上述属性。

1.3 提取规则

针对具体特征,我们给出多种提取规则,为了提供更好的逻辑层次结构,每种提取规则由上述 3 类属性集组成。每个提取规则可以从这 3 类基本属性集中任意选取某个属性,每个提取规则在特征提取中所占的比重可以通过比例因子调整。注意,是否包含某些属性取决于具体数据集。

为了清楚说明提取规则,首先引入隶属度算子。

隶属度算子 即一个提取规则推导出的表现隶属度大小信息的变量。

部分提取规则如下:

Helicity 规则 利用标准螺旋结构 H_n 提取涡核线。

$$H_n = \frac{v \cdot \omega}{|v| |\omega|} \quad (1)$$

H_n 为速度 v 和涡度 ω 夹角的余弦值。前提是在靠近涡核的区域,该夹角很小。在极限情况下,即 $v \parallel \omega, H_n = \pm 1$,穿过该点流线的弯曲度为零(为直线)。首先确定跨平面上 H_n 的最大值点,也就是流线曲率最小的位置,然后从该点跟踪流线形成涡核线。

因为 $|H_n| \leq 1$,无需归一化处理,则隶属度算子为

$$H_{nSMD} = |H_n| = \left| \frac{v \cdot \omega}{|v| |\omega|} \right| \quad (2)$$

流线距离规则 利用四阶 Runge-Kutta 方法(实时交互过程中采用二阶 Runge-Kutta 方法)计算流线距离,流线距离隶属度算子。

如果流线 f 经过 x_1 和 x_2 ,则

$$d_{sSMD} = 1 - \int_{x_1}^{x_2} df \quad (3)$$

否则

$$d_{sSMD} = \infty \quad (4)$$

λ_2 规则 因为 $S^2 + \Omega^2$ 为实对称的,所以只有实特征值。令特征值为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 满足 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ 。如果某个点的 λ_2 为负,则该点属于涡区。另外,说明在 $\lambda_1 \leq 0$ 的位置也属于涡区,得到隶属度算子^[1]

$$\lambda_{2SMD} = \begin{cases} 0 & \lambda_2 \geq 0 \\ 1 & \lambda_1 \leq 0 \\ scale(-\lambda_2) & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $scale(*)$ 表示归一化处理。

2 实验结果与分析

采用 GPU 加速技术,主要利用 GPU 计算流场粒子的隶属度信息,目的在于提高算法的计算效率,从而实现有效的交互性。基于 VS 2005 开发环境,在配置为 Intel Pentium Core 1.86 GHz 处理器(2G 内存)和 NVIDIA GeForce9800 GTX 显卡(512M 显存)的 PC,实现了特征提取算法,交互接口利用 Qt 实现,值得注意的是,在其中不仅实现了上述交互式特征提取,也提供了自动特征提取方式。

首先说明如何将交互式特征提取和自动提取有效结合:如图 1,利用文献[4]提出的自动模糊聚类算法自动计算模糊算子,结合各种提取规则实现 3 维流场特征的自动聚类。同时,用户可以在此基础上自定义提取参数,实现有效的交互特征提取。下面以涡特征为例,结合不同的显示技术,说明具体实现过程中如何将交互式特征提取和自动特征提取有效结合,同时说明 IFRFE 在提取 3D 流场数据特征

时在发挥用户自身优势方面的作用。

返回舱数据包包含复杂的涡结构,IFRFE 处理结果如图 2 所示,通过交互式模糊特征提取算法,用户可以很容易自定义显示多种特征,如图 2 所示。(a) 显示流线距离规则以及 λ_2 规则在隶属度计算中比例因子分别为 0.1 和 0.9 时提取的特征,越接近涡核点,粒子的颜色越接近红色。主要显示涡核点信息;(b) 中流线距离规则以及 λ_2 规则在隶属度计算中比例因子分别为 0.9 和 0.1,“主要”显示涡区特征,与传统提取涡区特征不同的是,此处我们可以清楚看到粒子流经涡区后的轨迹;(c) 中速度、流线距离、 λ_2 、压强以及温度的比例因子分别为 0.1、0.1、0.1、0.1、0.6,此时不仅可以看到涡区特征,还可以观察到高温区(如图 2 黄色圆圈所示);(d) 中速度、流线距离、 λ_2 、压强以及温度的比例因子分别为 0.1、0.1、0.1、0.6、0.1,在主要考虑压强信息时,可以清除看到低压区与涡区的关系(如图 2 黄色圆圈所示)。

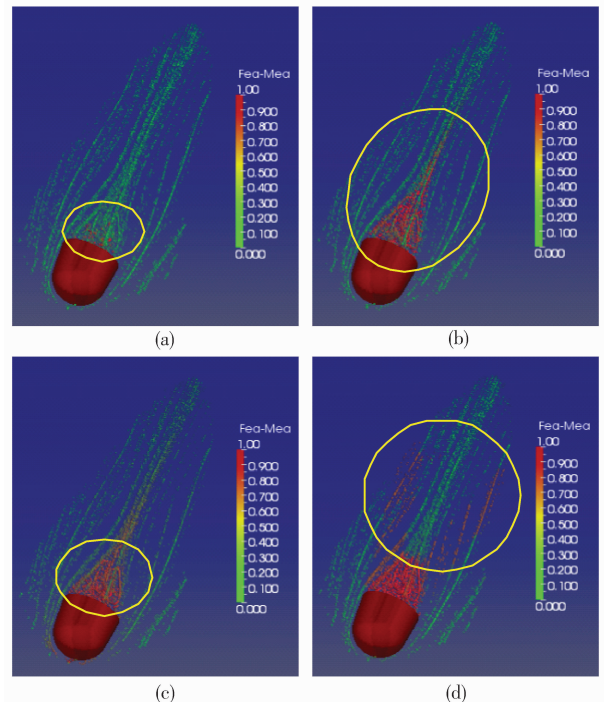


图 2 IFRFE 提取规则分析

Fig. 2 Analysis of the extraction rules in IFRFE

由此可见,与传统单一的提取规则相比,后者无法综合显示流场复杂特征,本文的交互式模糊特征提取算法不仅可以自动计算多种提取规则,而且允许用户交互定义提取特征,有利于同时显示多种用户的具体情况所关注的特征。

流线距离比例因子和 λ_2 比例因子分别取 0.6 和 0.4 时分析模糊算子 (散漫因子、集中因子) 对于特征提取的影响,如图 3 所示。其中 (a) 显示了不使用模糊算子的结果。(b)–(c) 图散漫算子为 2.0 和 6.0, 涡区相关粒子与背景粒子的对比度逐渐增强,同时,粒子流经涡区后的轨迹也越来越明显。

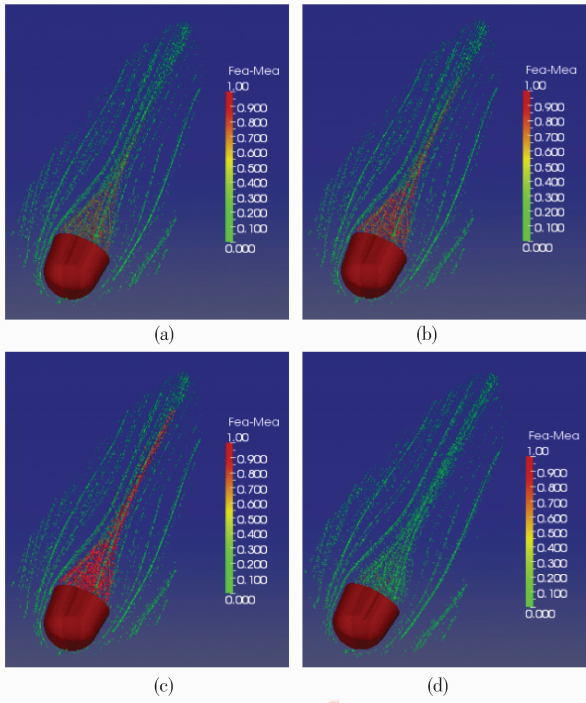


图 3 IFRFE 模糊算子分析

Fig.3 Analysis of the fuzzy operator in IFRFE

另一方面,利用集中因子缩小涡区范围,如 (d) 所示,集中因子为 6.0,此时,涡区已收缩为很小的区域点。

由此可见,基于模糊聚类的 IFRFE 可以有效显示数据集客观本质;数据点特征隶属的不确定性。

同时,图 4 (a) 显示了利用所开发的系统,用流线显示返回舱复杂的涡结构,并显示压强信息 (压强大小正比于颜色与红色接近程度), (b) 基于切面技术显示流场中速度大小信息 (速度大小正比于颜色与红色接近程度)。

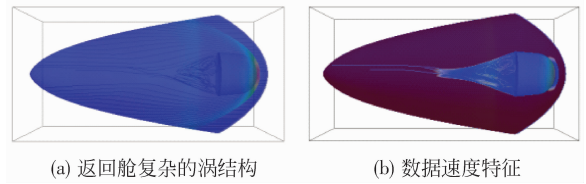


图 4 复杂数据特征

Fig.4 Complex features in dataset

另外,为了提高算法的交互性,我们使用了常用的交互式分析手段,如 Brushing^[6]、Linked Views^[7]、F&C^[8]、Multiple View 技术,如图 5 所示。例如,借助 Brushing 和 Linked Views 技术,选定左侧的某些点,在右侧高亮显示这些点的数据值。类似在右侧选择某个或某些数据值,左侧则自动高亮显示数据对应的点。另外,自由的缩放,也可以让用户清晰观察局部信息,全局 F&C 绘制可以显著观察数据集典型特征,也可以调整观察局部特征,如图 5 所示。

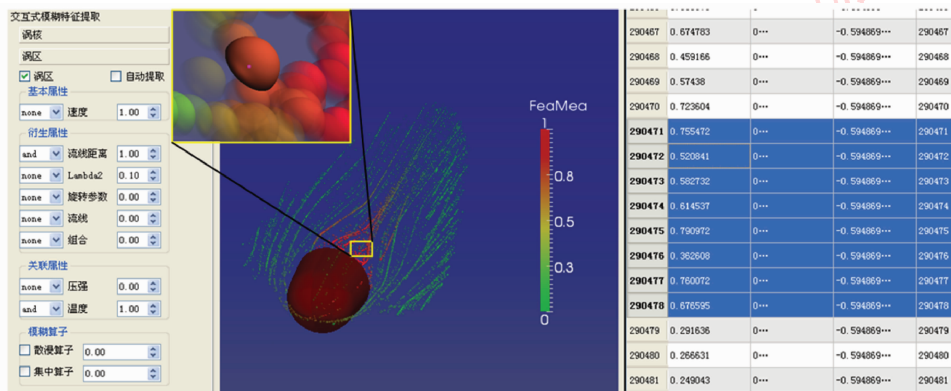


图 5 交互式模糊特征提取

Fig.5 Fuzzy-based interactive feature extraction

3 结论

给出交互式模糊特征提取算法以及基于此算法

开发的交互式 CFD 可视化系统,在保持原有算法准确度的同时,提供了良好的交互手段,拓展算法的适用范围以及实用性。最后针对具体数据集对于上述几点进行了验证,实验证明交互式模糊特征提取算

法与模糊特征定义语言共同提供了良好的交互式特征分析手段。

IFRFE 具有如下特点:

1) 通用性 有效提取简单 3D 流场特征以及复杂 3D 流场特征;

2) 实用性 有效描述数据集中特征点不确定性程度,显示数据所体现的客观事物的本质,另外,针对不同复杂特征提供多种可有效互补的提取规则,从而有效克服了不同特征提取方法自身的不足;

3) 有效性 理论上,模糊聚类分析已证明可以有效描述 3 维流场特征^[4-9],实践也证明,IFRFE 可以有效显示 3D 流场特征的不确定性。

下一步工作,需要拓展 IFRFE 处理时变数据,另外,需要提供处理其他 3 维流场典型特征的提取规则。

参考文献 (References)

- [1] Burger R, Muigg P, Ilcik M, et al. Integrating local feature detectors in the interactive visual analysis of flow simulation data [C] // Proc. EuroVis 2007. Norrkoping, Sweden; Eurographics Association, 2007: 171-178.
- [2] Doleisch H, Gasser M, Hauser H. Interactive feature specification for focus + context visualization of complex simulation data [C] // Proc. VisSym 2003. Grenoble, France: Eurographics Association, 2003: 239-248.
- [3] Mlejnek M. Feature-Based Volume Rendering of Simulation Data [R]. Vienna: VRVis Reasearch Center, 2003.
- [4] Xu Huaxun, Li Sikun, Ma Qianli, et al. Fuzzy description and extract methods of complex flow structure [J]. Journal of Software, 2010, Accepted. [徐华勋,李思昆,马千里,等.复杂流场特征区域模糊描述与提取方法 [J]. 软件学报,2010,已录用.]
- [5] Tang Zesheng, Chen Li, Deng Junhui. Visualization of 3D Data Sets [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999: 174-176. [唐泽圣,陈莉,邓俊辉.三维数据场可视化 [M]. 北京:清华大学出版社,1999:174-176.]
- [6] Novotny M, Hauser H. Similarity brushing for exploring multidimensional relations [C] // Proc. Of WSCG 2006. Campus Bory, Plzen-Bory, Czech Republic: WSCG, 2006: 105-112.
- [7] Buja A, McDonald J A, Michalak J, et al. Interactive data visualization using focusing and linking [C] // Proc. Of IEEE Visualization 1991. San Diego, America: IEEE Computer Society Press, 1991:156-163.
- [8] Muigg P, Kehrler J, Oeltze S, et al. A four-level focus + context approach to interactive visual analysis of temporal features in large scientific data [J]. Eurographics Association, 2008, 27 (3): 775-782.
- [9] Gao Xinbo. Fuzzy Clustering Analysis and Application [M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2004: 49-54. [高新波.模糊聚类分析及其应用 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2004:49-54.]