

网络拓扑结构可视化方法研究与发展

王松^{1,2}, 张野¹, 吴亚东¹

(1. 西南科技大学计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621010;

2. 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621010)

摘要: 网络拓扑结构可视化作为网络检测管理和网络安全态势感知的基础, 在呈现网络的整体状况和发现存在于网络拓扑中的潜在规律方面发挥着重要作用。介绍了网络拓扑结构可视化的基本内容, 从网络数据自身特点和用户需求角度分析目前网络拓扑可视化研究中存在的主要挑战。抽象领域专家分析理解网络拓扑结构中节点和连接状况, 洞察网络拓扑信息中性能瓶颈、网络安全、时变特性等潜在规律的过程, 提出一个自顶向下的VPI分析流程模型, 包括视觉接收、过程感知和交互参与。以VPI模型为指导, 从视觉感知增强、时变过程增强以及探索式交互增强3个方面综述了网络拓扑可视化方法的研究现状, 并结合应用需求展望未来的发展趋势。

关键词: 视觉感知增强; 时变过程增强; 探索式交互增强; VPI模型

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-109x.2018014

Survey on network topology visualization

WANG Song^{1,2}, ZHANG Ye¹, WU Yadong¹

1. School of Computer and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

2. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621010, China

Abstract: As the basis of network monitoring, network management, and network security situation awareness, network topology visualization plays an underlying role in reflecting the whole state of the network and discovering the potential rules in the network topology. The basic content of network topology visualization was introduced and the main challenges in the research of network topology visualization were summarized from two aspects: the internal characteristics of network data and the point of the applied demand angle of the users. A top-down VPI model for network topology visualization and analysis drawing from the experience of domain experts by analyzing and understanding the nodes and connection status of network topology, having an insight into the potential laws of topological information like performance bottleneck, network security, time-varying characteristics and so on. This model includes vision, procedure, and interaction. According to the VPI model, visualization methods based on perception enhance were summarized from three aspects: enhancement of visual perception, enhancement of time-varied procedure and enhancement of exploratory interaction. Finally, future development trend of those topics were discussed combined with application demand.

Key words: enhancement of visual perception, enhancement of time-varied procedure, enhancement of exploratory interaction, VPI model

收稿日期: 2018-01-03; 修回日期: 2018-02-04

通信作者: 吴亚东, wyd028@163.com

基金项目: 科技部“前沿科技创新”专项基金资助项目(No.2016QY04W0801); 四川省科技厅基金资助项目(No.2017TJPT0200, No.2017KZ0023, No.2017GZ0186)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2016QY04W0801), Project of Science and Technology Department of Sichuan Province (No.2017TJPT0200, No.2017KZ0023, No.2017GZ0186)

1 引言

网络拓扑发现和显示是现代网络管理的首要工作,借助网络拓扑结果可以了解当前的网络运行状态、判断网络拥塞、定位网络瓶颈、发现网络故障并分析发生的原因和位置,从而实现对整个网络的运行状态进行及时有效的监测和控制。可视化是一种通过交互式可视化界面来辅助用户对大规模复杂数据集进行分析推理的科学与技术,将数据中各种抽象的信息转化为图形信息,并通过各种图形交互技术,使人们加深对信息的理解和认识。网络拓扑结构可视化将网络节点的连接关系以点和线等构成的图形图像^[1]进行呈现,能够清晰直观地反映网络运行状况,辅助人们对网络节点、链路等各方面进行评估、预测和分析,有效地认识和了解网络内部信息、规律和变化^[2]。

近年来,计算机网络发展迅猛,网络结构的异构性、动态性、复杂性、发展的非集中性以及时变性等特征都给网络结构分析研究带来了巨大的挑战。要及时、快速、正确、完整地获取网络拓扑信息,生成清晰稳定的拓扑图,以图形方式将网络结构中的节点和连接状况清晰展现出来,为用户理解、分析目标网络的整体状况和发现存在于网络拓扑的潜在规律是网络结构可视化的研究重点和难点内容。

网络拓扑可视化自提出以来经过多年的发展,已经取得了显著的成果,在一定程度上解决了大量网络数据和有效分析手段之间的矛盾。但随着网络数据规模剧增、拓扑结构复杂性增强,直接对其进行可视化会导致显示重叠、层次信息难以观察等问题,无法有效降低网络分析人员的负担。针对上述问题并结合领域需求,总结目前网络拓扑结构可视化研究中主要存在的挑战如下。1) 网络节点和连边数目过大时,借助多样化的布局方式能够有效观察网络整体拓扑结构。布局算法主要需要解决如何确定和分配映射在有限显示空间内几何图形的各个节点和边的具体位置,良好的拓扑布局算法能够有效地避免显示出来的拓扑结构图中节点的重叠,能够大大地减少拓扑结构图中边之间的交叉,能够更加美观大方地展示出要处理的网络拓扑结构。2) 针对网络时

变数据在时空演化过程中可能出现的网络规模和网络结构剧变等情况,提供稳定的布局方式来避免大范围的布局更新造成的认知混乱和理解难度。网络时变数据中包含的网络节点种类与数目在随时间不断变化,网络节点之间的连接也在不断出现与消失,网络拓扑结构在节点出现与消失的过程中不断发生变化。稳定的布局方式能够保证在网络拓扑结构大范围变化的过程中用户的关注焦点不会发生突变,保持用户认知过程的连续性,降低对时变网络拓扑结构理解的难度。3) 在网络结构分析和挖掘中,能够提供有效的协同交互策略,实现兼顾网络高层次宏观结构和低层次局部细节的特征分析过程。借助可视分析技术,用户可以观察并分析不同时间粒度下网络拓扑结构的时变演化过程,逐层深入分析探究感兴趣区域节点的内部结构及其在整个拓扑结构中的作用,对比观察网络节点多属性之间的差异并分析特征区域内结构状态以及多属性变量之间的关联性。

2 网络拓扑结构可视化 VPI 分析模型

本文抽象信息安全领域专家分析理解网络拓扑结构中节点和连接状况,洞察网络拓扑信息中性能瓶颈、网络安全、时变特性等潜在规律的过程,提出一个自顶向下的 VPI 分析流程模型,包括视觉接收(vision)、过程感知(procedure)和交互参与(interaction)。该模型的主体思想是:提取网络拓扑结构特征进行几何映射,用户对绘制结果进行观察分析完成视觉接收,对于时变数据通过动画模拟等表达方式展现网络结构时变演化过程,从而帮助用户思考归纳,构建对网络数据时效性的基本理解;然后通过不断迭代的交互反馈优化绘制结果,并借助其他硬件辅助设备完善用户对大规模复杂网络数据潜在信息特征和规律的认知。VPI 模型是以网络数据为中心的分析流程,融合了信息安全领域专家分析复杂网络拓扑结构的几种常见分析思路。1) 由整体到局部,通过可视化呈现掌握整体网络布局结构,基于 Focuss+Context 理论实现迭代交互全方位展示用户感兴趣区域或节点的连接关系与运行态势。2) 由表面到内部,可视化绘制结果给用户直观的视觉感知,借助交互操作与先进的硬件设备洞察网络

拓扑深层内部结构,完成对网络结构数据的立体剖析。3)由生疑到解惑,对于生成的网络拓扑可视化呈现,用户针对不同方面产生的问题,通过基于视觉认知的人机交互与硬件优化,最终理解并解决复杂的网络监测、性能优化、故障分析和安全评估等问题。综合近几年网络拓扑可视化领域相关的学术成果,大多研究主题集中在网络拓扑可视化呈现的感知优化方面。以VPI模型为指导,将目前网络拓扑可视化方向的主要研究进展划分为视觉感知增强、时变过程增强以及探索式交互增强3个方面。图1是基于VPI模型的网络拓扑可视化分类结构的示意,本文按照该分类策略系统地整理了近几年大部分代表性网络拓扑结构可视化工作。

3 视觉感知增强类网络拓扑可视化

视觉感知增强类网络拓扑可视化方法主要侧重于对直观可视化呈现的优化,增强形状、颜色、深度等信息,以提高视觉空间表现力,有效传达网络数据拓扑信息,从而为用户提供更准确的视觉认知。尝试解决的核心问题包括对几何映射布局方式的优化,当网络节点与连边数目过大时仍能够有效呈现拓扑结构;对研究者关心的结构特征进行提取与呈现,以及如何实现对特定区域与特定节点的局部细节呈现,减少由于对象间遮挡导致的感知偏差。

3.1 布局方式优化

本文网络拓扑布局算法主要解决的问题是如何确定和分配映射在显示界面上的几何图形的各个节点和边的空间位置。一个好的拓扑布局算

法能够有效地避免拓扑结构图中节点的重叠现象,大大减少结构图中边之间的交叉问题,清晰美观的拓扑呈现便于管理人员获取网络信息,进行网络管理。拓扑布局算法可以分为物理布局方式和逻辑布局方式两大类^[3]。物理布局的主要思想是将节点的地理位置信息简单地解析为与其对应的布局坐标,使在拓扑图中能够清晰地发现节点的位置信息以及节点之间的相对位置和相对距离。逻辑布局主要根据网络拓扑得到的具体节点的情况设计分配节点的布局空间和布局策略,不依赖网络节点的物理位置,更侧重于网络节点的相互关系和网络拓扑图的内在特性。

常用的拓扑布局算法如下。1)树形布局算法。树形结构具有任意的深度和任意的宽度,所以树形布局算法具有很强的适用性、通用性,同时树形布局的结构简单直观,层次分明,连接显示清晰易判断。2)射线型布局算法^[4]。射线型布局的极坐标显示形式。射线型布局的最大优点在于空间利用率较高,分布相对比较均匀,在很大程度上避免了网络节点扎堆布局在一起的问题。3)层次型布局算法^[5]。针对图的内部层次结构关系特性对图进行分层处理,在呈现大型网络整体的同时,能够详细展示局部区域的连接关系。4)网格型布局算法。将界面分割成方形的网格状,直线交叉的位置安排网络节点进行绘制,这种布局充分地平均了节点的显示空间,从理论上杜绝了节点的重叠和网络节点过于集中的问题。5)力导向布局算法^[6]。为拓扑图中的顶点和边赋予一定的物理性质,通过对具有物理性质的顶点和边组成的系统的调整,使该物理系统达到一个

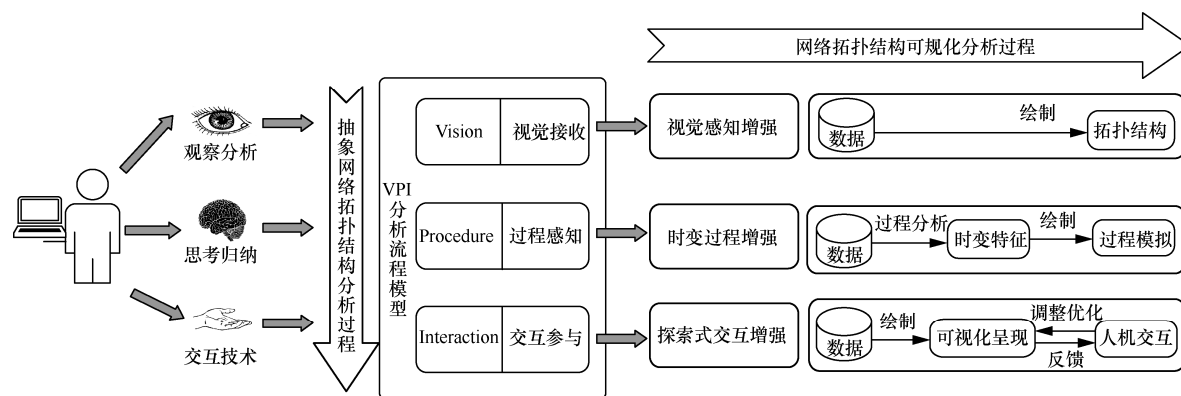


图1 基于VPI模型的网络拓扑可视化分类策略

力学平衡状态,从而实现对拓扑图的布局绘制。对于网络结构简单、节点数少、连接关系不复杂的网络能够有效解决连线密集、节点覆盖、图像聚集等问题。6) 启发式布局算法^[7]。采用分而治之的算法思想,将要处理的大型网络通过一定的规则或者条件分割成若干个较小的区域和集群,根据局部区域的特点采用合适的布局算法对小区域进行排序和布局。该布局策略在整体和局部都能够更好地体现出待处理网络本身具有的网络拓扑特性,在总体上大大降低了问题的规模和难度,布局效率明显提升。但常见的这几类拓扑布局算法仍然没有解决当图的规模变大时剧增的节点和边导致的布局规模和布局约束问题。

一个好的拓扑布局算法需要满足 3 个条件:

1) 有效避免拓扑图中节点的重叠; 2) 拓扑结构图中边的交叉尽可能减少; 3) 网络拓扑满足基本美学标准,如区域最小原则、边交叉最小原则、

节点密度均匀原则^[8]。Chaturvedi 等^[9]提出了一种名为 GIB (group-in-a-box) 的布局方式。如图 2(a) 所示(见彩插页 1),该布局方式为每个组绘制一个单独的矩形框,根据组包含的节点数确定大小。这些矩形框在屏幕空间中不连贯地排列。然后,使用力导向、圆形、网格或其他可用的布局在相关的框中放置单个组。组布局是独立于网络的其余部分完成的。GIB 布局可揭示组成员身份,本地组内网络结构和成员属性,这种有组织的安排对于其中由于节点和边缘数量过多而隐藏组内关系的网络特别有用;对于研究更广泛的群际关系也是有价值的。Yoghourdjian 等^[10]提出了一种分组网络的高质量超紧凑网格布局方法,利用 LNS 启发式算法找到一个初始的解决方案,然后通过选择一组节点进行迭代改进,并提出一种超紧凑的网格格式网络布局美学标准进行性能评估,高效地解决布局上的质量问题。Wu 等^[11]提出一种新

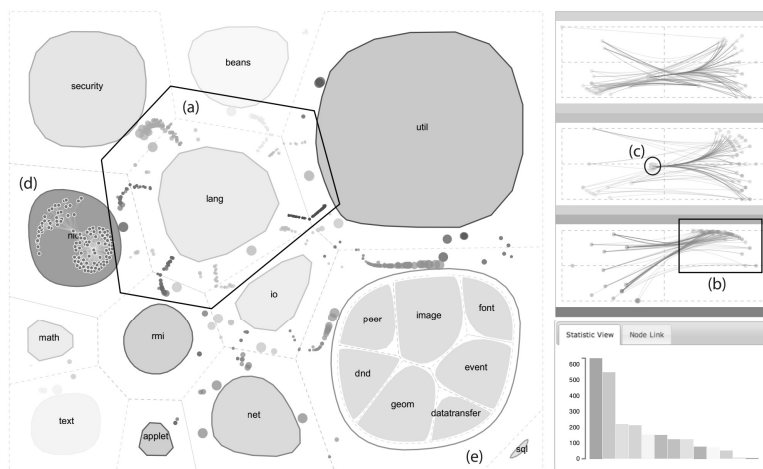
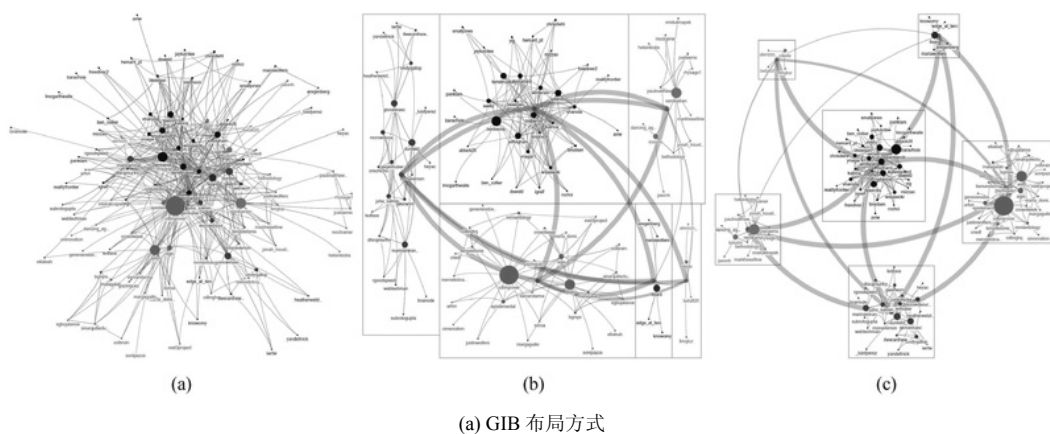


图 2 针对布局方式优化的网络拓扑可视化

颖的基于 Voronoi 树图的聚类布局方式。该方法先计算群体的属性、群体间的关联度等信息,根据群体的内部连接性、外部连接性及其组合以各种方式计算该群体的质量,最后借助格式塔定律对群体进行聚类。这种布局方式能更好地显示节点群体间的关联和分析其层次结构,如图 2(b)所示(见彩插页 1)。

3.2 减少视觉混乱与遮挡

结合人类在认知外部事物的过程中,充分利用了能够感知到的所有视觉信息来理解周围的世界。从视觉呈现的角度,对象间的遮挡会导致用户在感知上发生偏差引起认知错误,而大规模网络节点和边的绘制所导致的视觉混乱与遮挡问题随处可见。如何有效地呈现大规模网络结构内在的复杂性,实现视觉空间表现力极大化,尽量避免视觉遮挡与混乱现象,是视觉感知增强类网络拓扑可视化方法的一个核心研究方向。目前的研究思路分为 2 种:一是在尽量不减少原图信息量(包括边和节点的数目)的前提下对图进行边绑定;二是根据信息可视化的信息分级原则,对大规模图进行层次化简化。

边绑定算法的核心思想是在保持信息量(即不减少边和节点总数)的情况下,将图上互相靠近的边捆绑成束,从而达到去繁就简的效果。Cui 等^[12]提出的基于几何的边绑定方法第一次成功地解决了对任意图的边绑定问题。基本思想是在图上生成均匀的辅助网格,计算网格内边的平均走向,通过对相似网格进行合并实现对边走向的调整。Peng 等^[13]提出 SideKnot 绑定算法,与传统方法在中段进行合并不同,采取了在边靠近节点一侧按照走向进行绑定的策略,对连接到节点的所有边按其走向进行聚类,再对每个类根据边的平均方向和长度产生一系列控制点,最后以 B 样条的方式生成可视化效果,如图 3(a)所示(见彩插页 2)。Hurter 等^[14]提出基于核心密度估计的边绑定技术,先使用内核密度估算方法将给定的大图转化为密度图,对该密度图的梯度进行边缘平滑并反复迭代该过程,从而提供一个独立光滑的边绑定结构图,最后采用一种新的阴影技术来提高边绑定的视觉效果。在此基础上,Peysakhovich 等^[15]提出了一种属性驱动边绑定技术,如图 3(b)所示

(见彩插页 2),该算法先对多个属性进行兼容从而构成绑定图,分别计算边缘的方向和时间戳这 2 个流向图,然后计算这 2 个属性的子空间,再在这 2 个子空间的交集上计算出梯度,最终计算出多变准集合布局完成边绑定。属性驱动边绑定技术是一种基于边缘性兼容方案的新型框架,能够根据一或多个数值的边缘属性定义绑定图的兼容性,并支持 GPU 加速算法处理大规模数据集。Bach 等^[16]提出一种 CD (confluent drawing) 边绑定技术,对每个集合节点新建节点,将集合节点之间的连接关系转换成新建节点之间的连接。与传统的空间边绑定技术相比,该方法的优点在于能够按照图的拓扑结构进行边绑定,绑定结果更加注重图的连接关系。在提供给用户复杂连接图全局概览的同时,通过边的粗细与颜色深度呈现图中主要连接关系的信息,有效减少在图绘制中边的混乱程度。Bouts 等^[17]提出一种新的链接聚类和路由算法来实现边绑定。该算法通过完全成对分离方法对链路集群进行分类,采用贪心稀疏方法实现路由绘制和链接排序,从而通过支持用户自定义链路集群和路由算法计算链路路由,减少节点连接图绘制方式中出现的视觉混乱,如图 3(c)所示(见彩插页 2)。

图的拓扑结构包括节点和边 2 个部分,图的简化算法一方面对边进行提取,另一方面将强连通的节点进行聚类,从而将聚类后的节点集作为一个新的超级节点绘制到可视化结果中。Rosvall 等^[18]采用社区发现算法对节点进行聚类,如图 4(a)所示(见彩插页 3),原有的 6 000 多个节点被迅速缩小为 88 个超级节点,每个节点代表一个聚类,而节点的大小则被编码为聚类中原来节点的数目。Liao 等^[19]针对大规模复杂网络采用力导引布局呈现网络访问图,对于大型网络的节点连接图可能出现连线混杂等问题,通过基于网络拓扑信息的图压缩方法对图进行简化,利用中心点将网络的主机分成几个区域,从而大大简化了连接复杂度,并且凸显了关键主机。Shi 等^[20]提出一种用于大型异构网络的探索式可视分析集成框架 OnionGraph,通过可扩展的算法创建基于属性的聚合,并对各种结构的等价网络进行分区,从而结合语义和

拓扑信息进行分层抽象,实现对异构网络不同级别的查看。通过交互式探索,用户可以在网络上创建多个分层的焦点。每个聚焦的子网络都与一个独立的抽象概况相关联,如图 4(b)所示(见彩插页 3)。

Zinsmaier 等^[21]提出一种层次渲染的显示方法,采用基于密度的节点和边聚类表现方式解决视觉混乱问题。如图 4(c)所示(见彩插页 3),首先采用核密度估计算法创建密

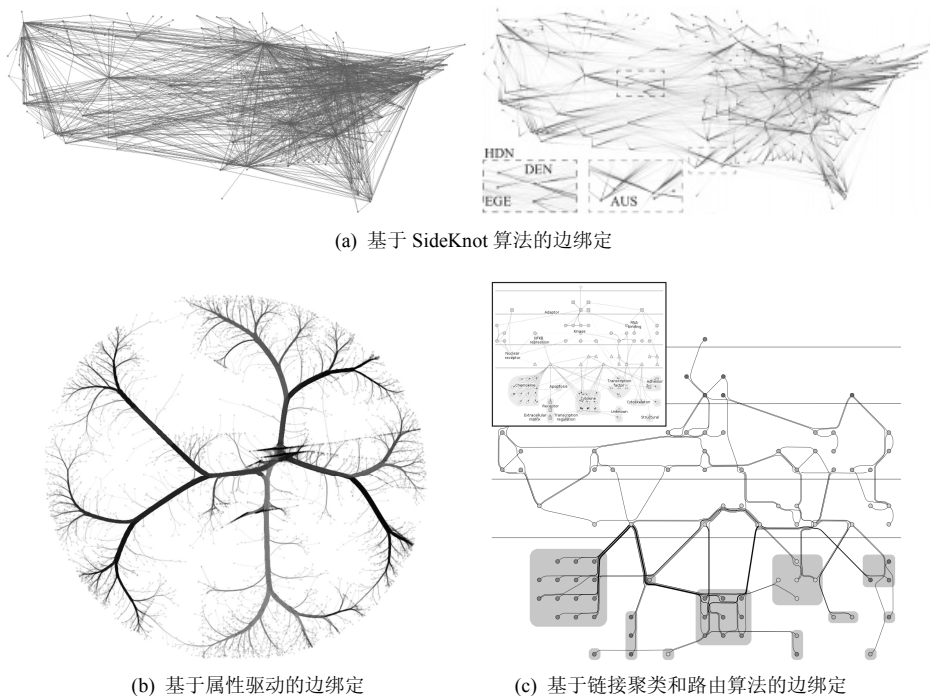


图 3 基于边绑定技术的视觉呈现优化

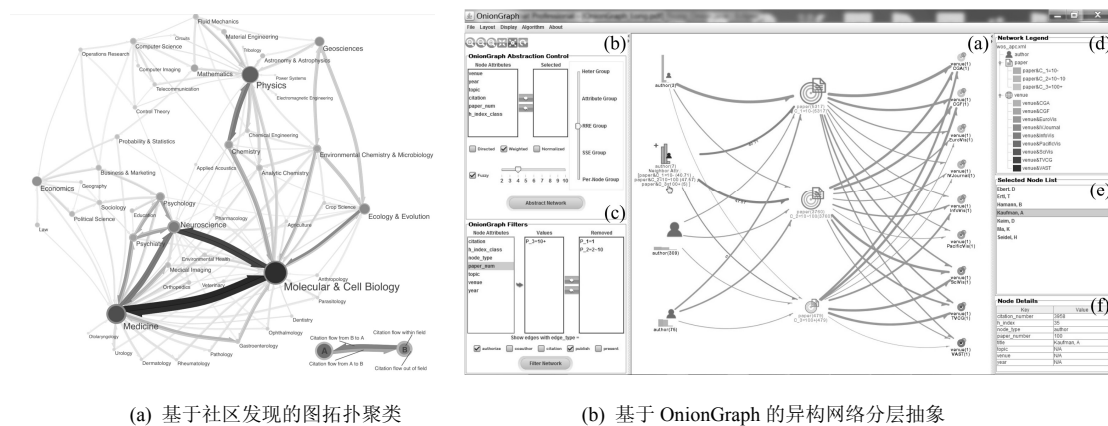


图 4 基于图简化技术的视觉呈现优化

度场实现节点聚合,借助攀爬算法实现与聚合节点在视觉上耦合的边聚合,从而允许用户交互式分析不同细节层面的直线大图绘制结果。

4 时变过程增强类网络拓扑可视化

时变过程增强类网络拓扑可视化方法主要侧重于呈现网络数据的动态特性,追踪拓扑结构的时间演变过程,有效表达节点和连线的数量和属性等信息随时间的变化过程,帮助用户更有效地理解复杂网络的拓扑结构,提高对动态网络数据的过程感知。综合目前动态网络拓扑可视化研究成果,大体划分为两类主要的增强方法。1) 时变过程动画法。通过动画等刻画时变信息的方式描述时变过程,帮助用户基于时间流的方式直观了解图演化过程,增强对复杂网络数据的时变认知。2) 特征跟踪法。动态图突然性的结构变化可能破坏用户的思维地图,继而破坏结构的稳定性。通过数据挖掘技术结合时间线等呈现方式有效跟踪结构特征变化,提高时变认知效率。

4.1 时变过程动画

由于时变网络的动画表达是将其时间序列直接映射到可视化的时间轴,构建一个随时间演化的动画布局序列,适合用户观察动态图在整体上的变化趋势。而单纯的动画呈现只是简单的布局直接转换,瞬间改变的信息容易给用户造成认知困难。目前广泛采用的方法包括动画过渡和增量式布局2种方法。动画过渡技术通过在布局之间的转换过程中增加一个阶段过渡, Benjamin 等^[22]设计的 GraphDiaries 系统在增减元素、转换布局等过程中都增加了过渡阶段来有效降低用户识别、跟踪和理解动态网络的变化过程。如图 5(a)所示(见彩插页 4),在删除元素阶段设计围绕顶点和边的红晕渐入动画,在增加元素阶段设计围绕顶点和边的蓝晕先渐入再消失,在转换布局过程中将保留的顶点和边光滑的移动到新位置等动画。Griffen 等^[23]通过动画过渡技术和“小倍数多重显示方法”的实验对比,发现动画过渡技术能够更准确和快速地发现动态图中空间和时间的聚类。Lin 等^[24]采用模拟退火算法保持动态图中的思维地图。思维地图是用户观察动态图可视化时在大脑中形成的抽象结构信息,通过动画过渡技

术维护用户的思维地图,保持网络布局的稳定性。

增量式布局方式是在时空演化过程中通过相对稳定的布局方式有效应对可能出现的网络规模剧变等情况,减少大范围的布局更新造成的认知混乱和理解难度。Fisherman 等^[25]针对包含潜在分组的顶点集提出一种增量布局算法,在动态演化过程中维持网络的聚类结构,避免大量节点的位置改变。在此基础上,文献[26]为了维持网络的全局结构,提出一种在线动态图绘制算法。如图 5(b)所示(见彩插页 4),该算法通过减少节点位移来保持用户的意象图,同时允许对连续的布局进行任意的增量修改。算法支持 GPU 加速并采用各种剔除方法减少布局时间,从而能够处理较大规模的网络数据。Che 等^[27]提出一种基于拉普拉斯的动态布局方法来保持时变图的整体结构。依据统一的节点分布和最小的交叉数量等审美标准,通过拉普拉斯嵌套距离约束算法对初始布局进行优化,支持自由地调整节点位置来保持图形组件的形状,同时支持用户自定义参数来保留意象图的程度,如图 5(c)所示(见彩插页 4)。

4.2 特征跟踪

特征跟踪法主要针对时变网络复杂结构进行划分,强调网络的层次化构成;突出重点环节的时变演化特性,并通过对比分析增强对时变演化过程关键步骤的理解认知。依据聚焦特征的不同,以及不同层次特征的呈现方式不同,特征跟踪法表现出不同类型的可视化绘制效果。Kumar 等^[28]通过基于边的分布构建层次模型,将复杂时变网络图以一种层次化的方式呈现。该布局重点关注中心节点和有代表性的节点,能够创建清晰的时变动画,保持帧间一致性,同时支持对节点和边的过滤交互,使用户能够深入查看细节,如图 6(a)所示(见彩插页 5)。James 等^[29]解决了数据规模达几十万个节点和数百万条边的动态网络可视化问题,为了发现和跟踪重要的网络元素,该文提出兴趣度的概念,它量化每个时间步上每个图形元素的兴趣程度,充分考虑动态图中相邻结构信息、节点或者边的属性数值以及它们随时间的变化。如图 6(b)所示(见彩插页 5),为了有效地分析全局概览和局部细节2个层次,该文在分析局部改变的同时保持全局动态网络的抽象视图。这

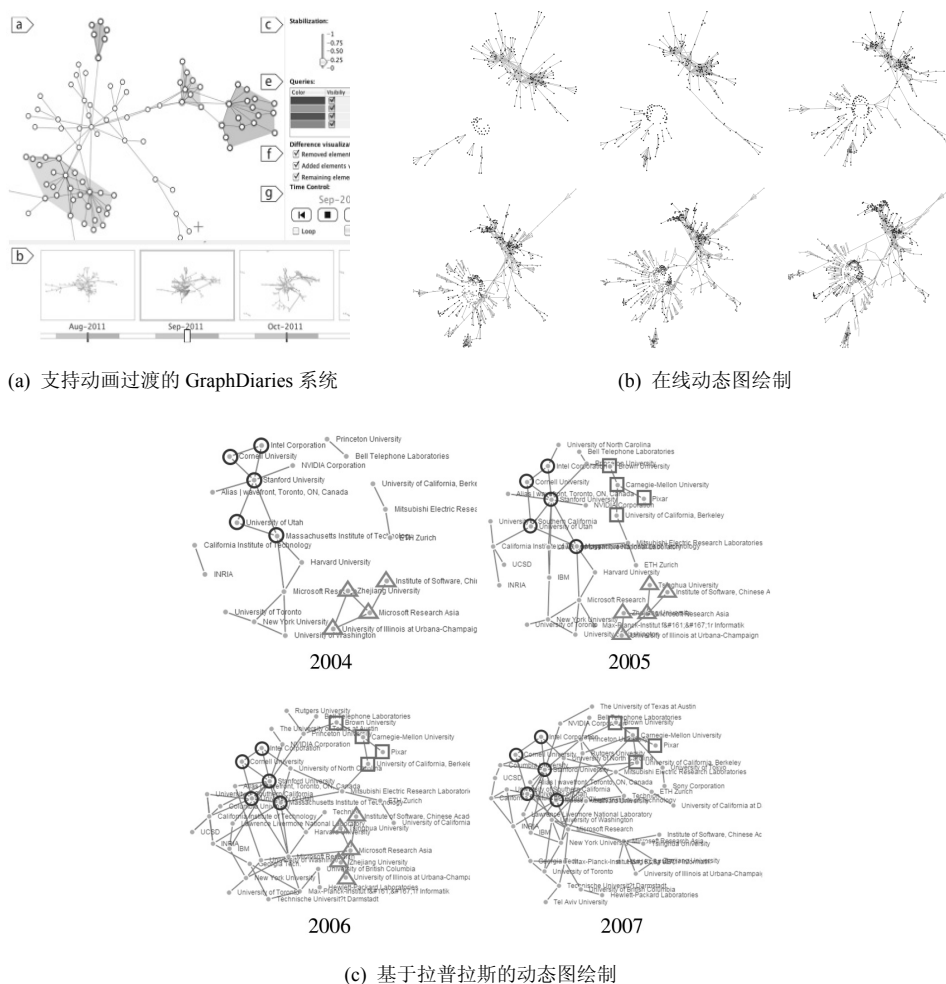


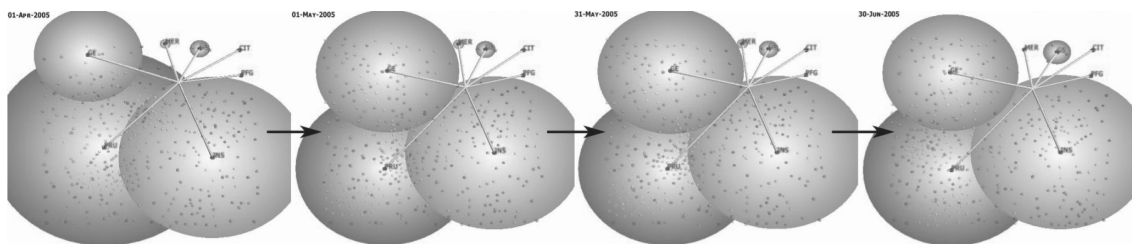
图 5 基于过程动画的时变网络拓扑可视化

样具有高兴趣度的元素在细节层次上被跟踪，低兴趣度的元素只在全局概览层次上整体显示时被跟踪。Cui 等^[30]提出一种 GraphFlow 的表现方式分析时变网络数据，采用一种静态流的编码方式呈现网络图中节点、边等度量属性的演化过程，并引入能量的概念定量分析特征属性的变化量，方便用户轻松识别演化图中的关键部分。此外，通过关联一组排列良好的节点链接图，GraphFlow 支持用户比较不同时间点的详细网络拓扑结构，如图 6(c)所示（见彩插页 5）。

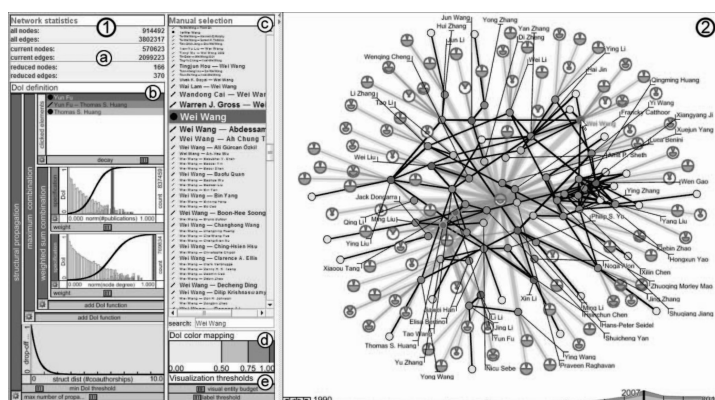
5 探索式交互增强类网络拓扑可视化

网络拓扑可视化算法除了视觉呈现部分，另外一个核心要素是用户交互。交互是用户通过与系统之间的对话和互动操作和理解数据的过程。交互操作有效地缓解了有限的可视化空间和数据

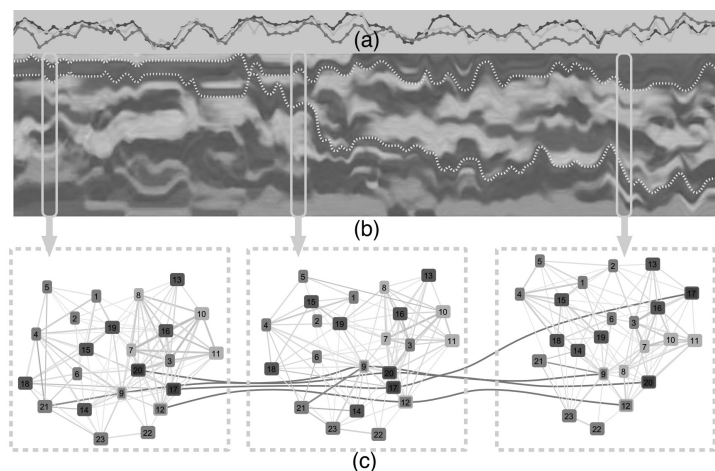
过载之间的矛盾，帮助拓展可视化中信息表达的空间，从而解决有限空间与数据量和复杂度之间的差距。同时交互能让用户更好地参与对数据的理解和分析，帮助用户探索数据、提高视觉认知。Shneiderman^[31]早期提出可视化信息搜索的基本原则，归纳了几种最基本交互操作，包括概览、缩放、过滤、按需提供细节、关联、记录和提取。Kein^[32]提出了 5 类交互模式：投影、过滤、缩放、失真变形、链接与刷动。Ward 等^[33]在按照交互操作分类的基础上，进一步提出了更完善的框架，定义交互为操作符和操作空间的组合。其中，操作符包括 3 类：导航、选择和变形；操作空间包括 6 种：屏幕空间、数据值空间、数据结构空间、属性空间、对象空间和可视化结构空间。大多可视化中交互技术都可以按照上面描述的操作符和操作空间表示。综合近几年网络拓扑可视化方面



(a) 基于层次划分的时变过程呈现



(b) 基于兴趣度的动态网络可视化



(c) 基于 GraphFlow 的时变网络可视化

图6 基于特征跟踪的时变网络拓扑可视化

的交互研究，主要的研究热点如下。1) 焦点+上下文交互。致力于显示用户兴趣焦点部分的细节信息，同时体现焦点和周边的关系关联，整合当前聚焦点的细节信息与概览部分的上下文信息。2) 直接交互。通过直观的交互方式直接操作于可视化绘制结果，提高交互效率与交互结果的可预测性，降低用户认知困难、精力分散等交互障碍。3) 关联性交互。借助可视分析技术，深入探究网络数据的深层隐含信息与特征之间的关联性，采用多视图

等表达方式帮助用户同时观察网络的不同属性，支持从不同角度和不同显示方式观察数据，提高对复杂网络拓扑结构的认知深度。4) 沉浸式模拟。它是虚拟现实技术与网络拓扑可视化技术的有效结合，借助直观的立体成像、三维交互、立体听觉和三维触觉反馈等保证用户在虚拟环境中的沉浸感，提高分析和理解网络结构数据的效率和质量。

5.1 焦点+上下文交互

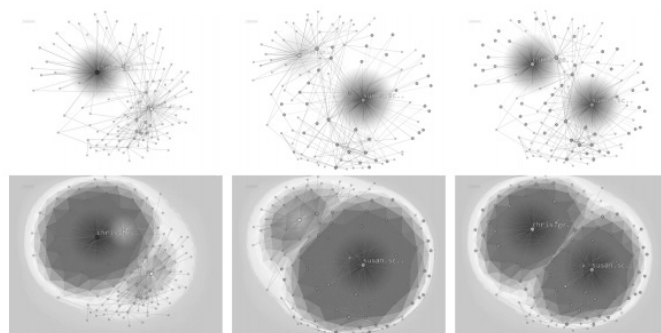
焦点+上下文作为信息可视化领域的常用交互

方式,其基本思想是将用户关心的区域定义为焦点区域,采用高亮等方式显示细粒度信息;其他区域作为上下文区域,通过聚合等操作显示粗粒度信息。该概念被引入网络拓扑可视化中后,在提高绘制效率的同时,能够有效地处理庞大数据集中提取用户感兴趣部分的问题,有利于解决三维映射阻塞现象,受到大量网络拓扑结构可视化研究人员的青睐。Robert 等^[34]开发了网络可视化系统 VISUAL 用于感知内外网主机通信模式,采用主机位置固定策略,内网主机的网络矩阵在中心区域,外网主机分布在四周,从连线的多少和外网主机方块大小可以很直观地发现一些异常活跃的内外网主机,主机位置固定策略能够保持良好的主机逻辑拓扑关系。支持“先概览,然后缩放和过滤,最后根据需求详细分析”的交互过程帮助用户建立对网络活动模式的精准理解。文献[20]提出的可视化集成框架 OnionGraph 中,网络节点的子集可以在分层的焦点+上下文交互模型下进行灵活的分割和合并。通过交互式探索,用户可以在网络上创建多个分层的焦点,每个聚焦的子网络都与独立的抽象概况相关联,从而实现对复杂网络的多层次分析。Feng 等^[35]提供一种新的时变网络绘制方法,采用超图的概念保持网络数据的时空一致性,同时支持多焦点+上下文的交互方式维持交互过程的动态稳定性,通过阻止节点尺寸和位置发现突变来保护用户的思维地图,从而提供可读性更强的视觉效果,如图 7(a)所示(见彩插页 6)。鱼眼变换^[36]也是一种基于焦点+上下文技术的常用交互手段,它使用一种焦距极短并且视角接近于 180°的镜头,在突出正前方物体的基础上,覆盖角度所及的范围最广。通过鱼眼技术在网络拓扑图分析过程中可以根据用户关注的焦点进行有针对性的缩放,从而揭示局部区域内节点的连接关系。Tominski 等^[37]采用鱼眼树形视图和组合透镜来支持对网络拓扑视图的可视化探索。如图 7(b)所示(见彩插页 6),通过鱼眼扭曲算法实现对聚类图层次结构的分析,组合透镜技术促进对大规模稠密拓扑布局的信息呈现,其中,局部边透镜用于解决图的边遮挡问题,邻居透镜用于呈现当前聚焦节点的邻接节点。Van 等^[38]将网络拓扑聚类抽象成大颗粒的节点,同时边也根据聚类特征聚合为不同粗细的集束,当用户希望浏览具体的细

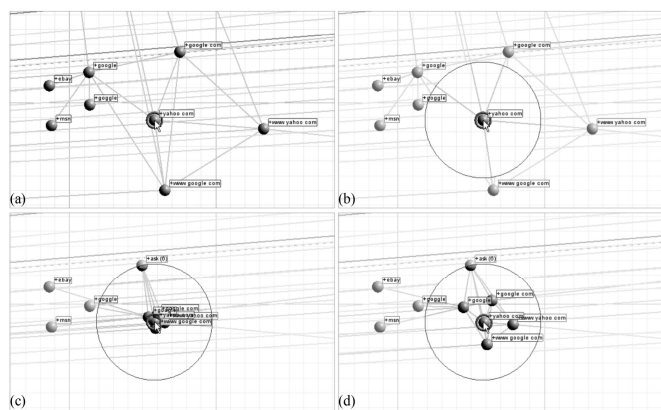
节时,可通过透镜将抽象结构逐级细化,最终分解成准确的结构。如图 7(c)所示(见彩插页 6),当透镜接近颗粒时,颗粒开始分解,完全被透镜覆盖的区域显示具体而准确的图结构。针对规模特别庞大的图结构,Gansner 等^[39]提出拓扑鱼眼技术,先计算出复杂网络拓扑结构在不同尺度下简化后的结构表达,当用户指定了关注区域后,不同层级的简化结构表达被混合显示,以达到从关注区域到外沿细节不断减少的效果,最后在关注区域实施鱼眼式的径向放大,从而既保持足够的细节信息,又不丢失原图结构粗略的轮廓。

5.2 直接交互

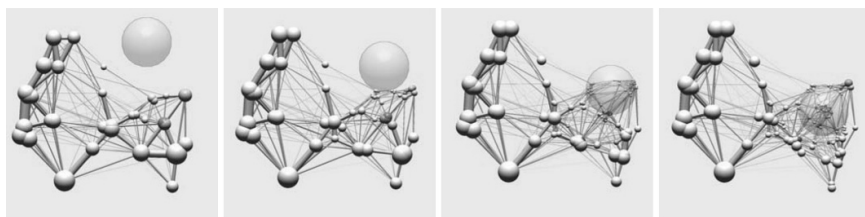
直接交互方式通过直接操作可视化绘制结果进行更深层次的挖掘与分析,有效地提高交互效率与交互结果的可预测性,降低用户认知困难、精力分散等交互障碍。Frisch 等^[40]在交互式显示屏上采用多点触控和笔手势实现对网络拓扑图的交互式结构编辑和草图绘制。如图 8(a)所示(见彩插页 7),以网络图分析需求为核心设计了笔手势集合,包括创建图元素(节点、边)、选择和移动节点、删除图元素、修改边类型、成比例缩放和移动等。Schmidt 等^[41]对图可视化中的多点触屏交互技术进行了深入的研究。针对节点-链路的布局方式,设计了一系列的交互集合实现对网络图中边的探索分析,有效解决节点-链路布局中边数目过多造成的视觉遮挡。交互操作包括接触拉动、接触定位、接触波动、接触绑定和透镜扭曲。Prouzeau 等^[42]在大屏显示墙上借助多用户触控交互来探索网络图的拓扑结构,重点关注用户间协同交互来提高对复杂拓扑图的理解效率和准确性,包括局部区域选择和从原始节点扩散的过程选择交互,如图 8(b)所示(见彩插页 7)。Kister 等^[43]将可被检测位置的移动设备和大屏结合起来,利用移动设备交互自然和大屏幕显示信息丰富的优点,设计一套全面的交互模型支持对网络图的交互、分析任务,包括选择、展示细节、焦点转换、交互式透镜、数据编辑等。如图 8(c)所示(见彩插页 7),用户通过触摸、单击、移动等肢体动作直接操控移动设备,从而实现对大屏幕显示场景的探索式交互。



(a) 支持多焦点+上下文交互的网络拓扑可视化

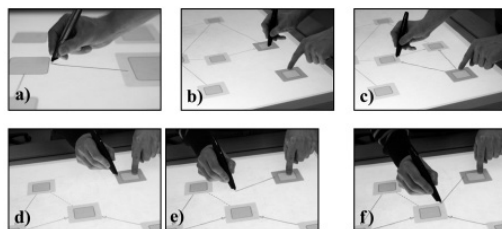


(b) 基于鱼眼变换和组合透镜的网络拓扑分析

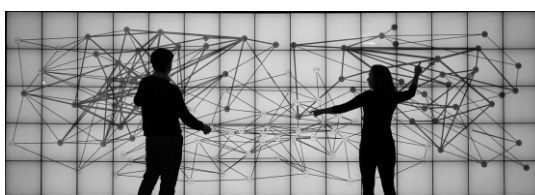


(c) 基于局部聚类特征的图结构交互浏览

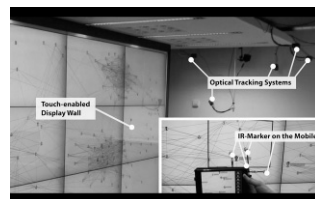
图7 基于焦点+上下文交互的网络拓扑可视分析



(a) 基于多点触控和笔手势的交互分析



(b) 支持多用户协同过程交互分析



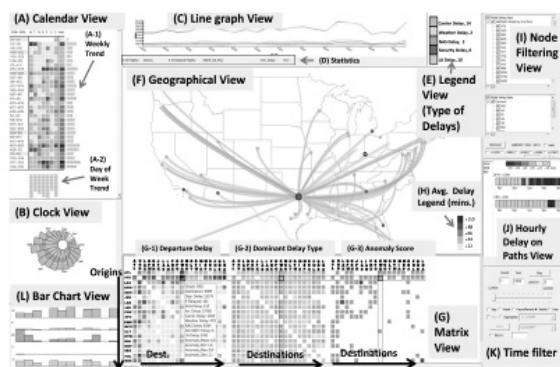
(c) 基于移动设备直接交互

图8 基于直接交互的网络拓扑可视分析

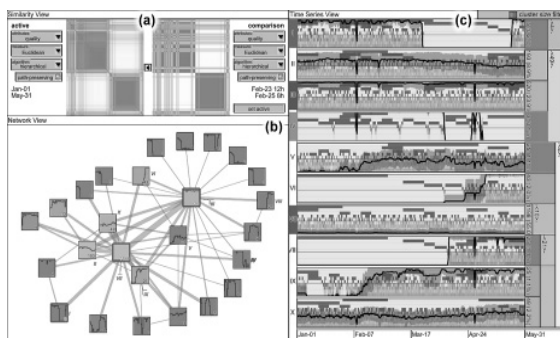
5.3 关联性交互

多变量可视化领域的交互基本上已经形成, 其以多关联视图为基础, 分析视图用于显示和分析属性关系, 主呈现视图用于显示网络拓扑结构特征, 使用高维传输函数和画刷及其衍生技术为特征选取技术, 以焦点+上下文或其他变种为数据和特征显示方法的基本框架。关联性交互是多变量可视化交互的基础和重要手段, 在分析变量之间的相互关系以及建立数据空间和各种抽象空间的联系方面, 有着无可替代的作用。近年来, 多变量大规模时变网络数据越来越复杂, 网络数据分析越来越抽象, 大多研究工作的研究重心逐渐偏向于对网络属性之间的关系和变化趋势的分析。Rufiange 等^[44]提出的 DiffAni 系统针对时变网络数据采用混合差分图和动画技术, 通过按时间排序的连续块可视化动态图, 其中每个块包含一个或多个时间步布局。DiffAni 支持 3 种类型块: 差分块显示某时间段内各时间步布局之间的差异; 动画块显示某时间段内布局的变化过程; 小组图块显示某时间步的动态图状态。通过各个模块之间的协同交互可以快速识别网络拓扑改变, 定位跟踪感兴趣的顶点。Ko 等^[45]利用多视图综合各种可视化技术探索高维多变量的时空网络数据, 并提出 Petal 和 Thread 可视表达共同有效地呈现具有多变量属性的动态有向网络, 其中, Petal 表示网络数据的概览视图, Thread 编码节点多变量属性的关联细节。该方法还有效地利用信息理论模型实现跨维度的异常检测、异常的高亮显示和探索过程的管理, 如图 9(a)所示(见彩插页 7)。Hadlak 等^[46]采用相关时间属性聚类算法支持对动态网络拓扑结构的可视分析。如图 9(b)所示(见彩插页 7), 通过在时间维度上对节点或边的属性进行聚类, 将原始的图数据划分成多个聚类, 把每个聚类当作节点构造超图, 通过相似度视图、多尺度时间属性图、全局网络视图相互关联来交互探索和改善聚类结果, 进一步指导用户分析动态网络。Dang 等^[47]提出一种新颖的可视化展示形式 TimeArcs 来可视展示、分析动态图中的波动模式。在 TimeArcs 构建过程中, 根据节点的权重和节点与节点之间的关联强度, 过滤出重要的关联关系; 并在力导向布局算法中添加限制, 对剩余

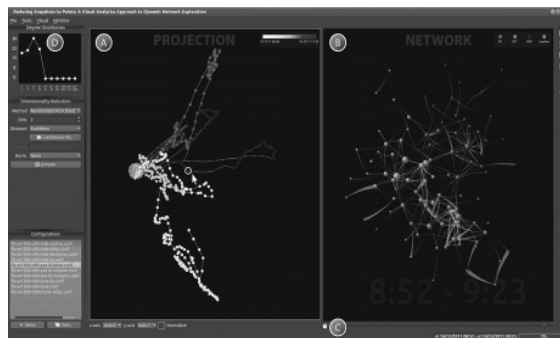
的节点及其关联关系进行布局。在可视化阶段, 采用直线表示节点, 曲线连接 2 个具有关联关系的节点。Elzen 等^[48]提出一种新颖的方法来分析动态图的变化模式。如图 9(c)所示(见彩插页 7), 将每个时间步的网络转换成高维向量, 将这些高维向量投影到二维平面, 用点表示。投影后得到的布局中, 每个点表示一个时间步的 snapshot, 每条边连接了 2 个相邻时刻的顶点。通过不同视图间的关联互动可以有效地帮助用户探索分析动态图的稳定状态、重现状态、异常状态以及状态与状态之间的转移过程。



(a) 基于多视图协同的高维网络分析



(b) 基于时间属性聚类的动态网络分析



(c) 基于高维向量二维投影的动态网络分析

图 9 基于关联性交互的网络拓扑可视分析

5.4 沉浸式模拟

沉浸式模拟通过在深度信息增强的虚拟环境中支持直接交互数据,为用户提供一种更具体的主动学习方式。Dede^[49]的研究表明,沉浸式模拟借助多维视角、情境学习和场景变换,能够帮助用户个体更好地理解并保留空间信息,有效分析复杂现象。虚拟现实技术与网络拓扑可视化技术的结合,从本质上拓展了人机交互手段,有效地提高了分析和理解网络结构数据的效率和质量。Tong 等^[50]将沉浸式引入三维图可视化中,以 Oculus Rift + Leap Motion 为开发平台,借助空间变形模型和镜头形状模型,在有效解决视觉遮挡等现象的同时,可保持三维空间结构特征;并在沉浸式环境下凸显深度信息,为解决三维图可视化中视觉遮挡与覆盖问题提供了新的思路,如图 10(a)所示(见彩插页 8)。在此基础上,Huang 等^[51]针对沉浸式环境中的手势交互问题,从直觉感受、操作可行性和符合人体工程学 3 个角度出发,设计了 8 种手势交互动作,并通过引入虚拟弹簧模型缓解原始手势异常抖动等问题;最后从精确度、操作难度、完成时间和用户体验等方面验证沉浸式模拟下手势交互在探索网络结构可视化方面的有效性。Kwon 等^[52]为了在沉浸式环境下取得更良好的

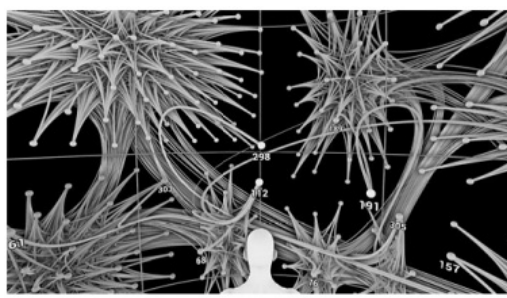
立体视觉效果,将网络节点通过球心投影算法映射到球面上,并采用球面线性插值改进的 de Boor 算法将所有边以边绑定的方式呈现在球面的表面上,再采用深度路由方法将边拉出球面,减少边与点的交叉和遮挡,从而提高沉浸式环境下对网络数据的分析理解精度和效率,如图 10(b)所示(见彩插页 8)。Cordeil 等^[53]则通过实验对比在传统 CAVE 沉浸式虚拟现实环境和头戴式设备 HMD 这 2 种沉浸式环境下完成网络图连通性探索任务时的性能表现、合作效果和用户体验,证明 HMD 在完成分析任务的效率和沉浸式肢体交互性能上的优越性,如图 10(c)所示(见彩插页 8)。

6 网络拓扑可视化工具

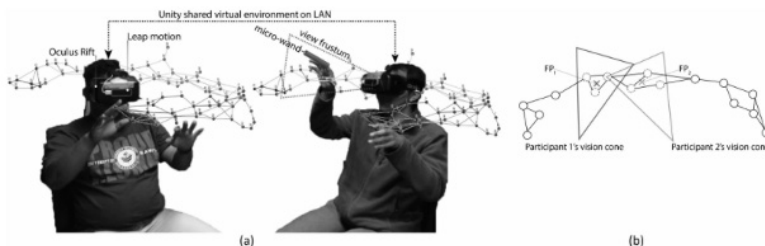
网络可视化工具种类、数量繁多,目前市场上主流的通用网络可视化工具包括 NodeXL、Gephi、Cytoscape、yEd、GraphViz 等,这些工具功能丰富、适用性强,并不局限于特定的使用目的。其中,NodeXL 是一个免费的 Excel 插件,专门设计用于自动收集社交网络数据,为图组织数据以及可视化图,主要用于分析社交网络。Gephi 是一款开源、免费跨平台、基于 JVM 的复杂网络分析软件,主要用于各种网络和复杂系统,动态



(a) 沉浸式交互式图可视化



(b) 基于球面布局的沉浸式网络分析



(c) 基于交互协作的沉浸式网络可视分析

图 10 基于沉浸式模拟的网络拓扑可视分析

和分层图的交互可视化与探测开源工具。Gephi 提供了各类代表性图布局方法并允许用户进行布局设置,支持时变网络数据可视化并支持用户实时过滤网络,从过滤结果建立新网络。Gephi 使用聚类 and 分层图的方法处理较大规模的图,通过加速探索编辑大型分层结构图来探究多层图,如社交区和网络交通图;利用数据属性和内置的聚类算法聚合图网络。Gephi 适用于处理大规模网络数据,处理的图规模上限约 50 000 个节点和 10 000 000 条边。Cytoscape 是一个提供开源的网络可视化和分析软件系统。Cytoscape 提供了直观的界面,可用来创建可视化及可视化交互,与其他软件包相比,具有更加广泛的视觉特性,灵活的映射、注释和交互式输出。几乎任何视觉特性都可以被映射到数据,包括大小、颜色、节点边框颜色、节点边框宽度、节点透明度、边的线条类型、边的透明度等。其最初是专注于生物网络的可视化和相关数据的融合,随着功能不断地扩展,已经成为面向各种复杂网络的可视化工具。不过强项依然是生物网络,最吸引人的是众多的插件和强悍的数据融合能力以及其强悍的互动能力。yEd 提供了很强的通过鼠标单击创建和编辑图的能力,能够生成特殊类型的图,同时提供许多健壮的布局和良好的标签处理能力,并能够根据布局规则布置多次拐弯的连接。GraphViz 是由贝尔实验室设计的一个开源的图形绘制工具,支持 Windows、linux 和 Mac 等各种操作系统,使用一个特定的 DSL(领域特定语言)——dot 作为脚本语言,并使用布局引擎解析此脚本,提供自动布局算法。GraphViz 的 dot 脚本语言非常简单方便,而且提供了大量的自动布局算法和丰富的导出格式供用户选择。支持将结构输出整合到文本、网页和应用程序。它的强大还主要体现在“所思即所得”,即用 GraphViz 来绘图时,GraphViz 会安排好各种事情,不用自己思考太多。虽然这些工具或软件包都有各自的功能特点,但在可扩展性、大规模数据处理、表现方式优化、自主可控等方面仍然存在诸多缺陷。

7 结束语

本文首先介绍了网络拓扑结构可视化基本理

论,从网络数据自身特点和用户需求角度分析网络拓扑可视化的基本特点与要求。结合近年的研究工作,总结了目前网络拓扑结构可视化研究中存在的主要挑战。文中介绍了感知增强类网络拓扑可视化方法的基本理论,抽象领域专家分析理解网络拓扑结构中节点和连接状况,洞察网络拓扑信息中性能瓶颈、网络安全、时变特性等潜在规律的过程,提出一个自顶向下的 VPI 分析流程模型,包括视觉接收、过程感知和交互参与,并以 VPI 模型为指导,从视觉感知增强、时变过程增强以及探索式交互增强 3 个方面分析目前网络拓扑可视化方向主要的研究进展。其中,视觉感知增强类网络拓扑可视化方法包括布局方式优化和减少视觉混乱与遮挡这 2 个方面,从不同角度提高视觉空间表现力,从而提供更准确的视觉认知。时变过程增强类网络拓扑可视化包括时变过程动画和特征跟踪,重点突出时变网络数据的演化过程与复杂结构,提高对动态网络的结构感知、过程理解和时变认知。探索式交互增强类网络拓扑可视化包括焦点+上下文、直接交互、关联性交互和沉浸式模拟,通过不同类型的交互操作有效缓解了有限的可视化空间和数据过载之间的矛盾,帮助拓展可视化中信息表达的空间,实现从不同角度和不同显示方式观察数据,提高对复杂网络拓扑结构的认知深度。不同类型的感知增强类网络拓扑可视化方法基本原理、核心步骤与依赖条件各不相同,但都围绕有效展现网络拓扑结构特征、各属性间的相互作用及其复杂的时变网络演化过程,为用户提供良好的网络拓扑可视化分析环境,提高网络数据处理效率和可视分析能力这一研究目标在进行不断的算法改进和理论创新。

随着数据规模的继续扩大,属性信息的不断增加,以及在用户应用需求方面精细化、实用化和普适性要求越来越高,给网络拓扑可视化的不同研究方法带来新的发展机遇和挑战。

1) 视觉感知增强方面。布局方式上的基本模型样式趋于饱和,构造更新颖的网络拓扑布局算法不再是主流研究方向,更加趋向于以多种可视化表现方式综合绘制的方法提高视觉表现力。针对大规模网络节点和边的绘制所造成的视觉混乱

和遮挡问题仍然会是主要难点问题。同时强调布局算法方法的普遍适用性和实用化,要求算法设计与用户关心的对网络拓扑结构的理解认知紧密结合,促进新技术方法的推广应用。

2) 时变过程增强方面。随着数据的特殊性和结构复杂性不断提高、数据流的规模扩大,如何在动画呈现中保持用户的思维地图,通过相对稳定的布局方式有效应对可能出现的网络规模剧变等情况,减少大范围的布局更新造成的认知混乱和理解难度,有效呈现易于理解的层次结构和特征时变演化过程,高效地挖掘和分析随时间演变的流动规律。

3) 探索式交互增强方面。直接交互方式将在大屏超分辨率绘制中发挥越来越重要的作用。同时随着多变量网络数据越来越复杂,网络数据分析越来越抽象,研究重心将围绕对数据属性之间的关系和变化趋势的分析。关联性交互借助可视分析技术,深入探究网络数据的深层隐含信息与特征之间的关联性,在分析变量之间的相互关系以及建立数据空间和各种抽象空间的联系方面有着无可替代的作用。同时随着虚拟现实技术的火热发展,沉浸式模拟将成为未来可视化展示的主流方式,先进的增强现实技术如何借助输入设备和显示屏与可视化绘制过程完美结合,开展在通过沉浸式模拟和交互提高网络拓扑结构可视化质量以及分析和理解网络数据的效率等方面深入的研究势在必行。

参考文献:

- [1] ROHRER R, SWING E. Web-based information visualization[C]//IEEE Computer Graphics and Applications. 1997: 52-59.
- [2] 王宇晓.大规模网络拓扑可视化研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
WANG X Y. Research on large-scale network topology visualization[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [3] 张伟明, 罗军勇, 王清贤. 网络拓扑可视化研究综述[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(6): 1606-1610.
ZHANG W M, LUO J Y, WANG Q X. Survey on network topology visualization[J]. Application Research of Computers, 2008, 25(6): 1606-1610.
- [4] GRAHAM J W. Nicheworks-interactive visualization of very large graphs[J]. Journal of Computational and Graphical Statistics, 1999, 8(2): 190-212.
- [5] SUGIYAMA K, TAGAWA S, TODA M. Methods for visual understanding of hierarchical systems[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics, 1981, 11(2):109-125.
- [6] AU S C, LECKIE C, PARHAR A, et al. Efficient visualization of large routing topologies[J]. International Journal of Network Management, 2004, 14(2):105-118.
- [7] 何鹏, 陆建新, 施俊, 等. 一种园区级网络拓扑图布局算法[J]. 微计算机信息, 2007, 23(3): 143-145.
HE P, LU J, SHI Q, et al. A campus scale network map layout algorithm[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(3): 143-145.
- [8] WARE C, PURCHASE H, COLPOYS L, et al. Cognitive measurements of graph aesthetics[J]. Information Visualization, 2002, 1(2): 103-110.
- [9] CHATURVEDI S, DUNNE C, ASHKTORAB Z, et al. Group-in-a-box meta-layouts for topological clusters and attribute-based groups: space-efficient visualizations of network communities and their ties[J]. Computer Graphics Forum, 2014, 33(8): 52-68.
- [10] YOGHOUDJIAN V, DWYER T, GANGE G, et al. High-quality ultra-compact grid layout of grouped networks[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2016, 22(1): 339-348.
- [11] WU Y, WU W, YANG S, et al. Interactive visual summary of major communities in a large network[C]// IEEE Pacific Visualization Symposium, 2015: 47-54.
- [12] CUI W, ZHOU H, QU H, et al. Geometry-based edge clustering for graph visualization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(6):1277-1284.
- [13] PENG D, LU N, CHEN W, et al. SideKnot: revealing relation pat-terns for graph visualization[C]//IEEE Pacific Visualization Symposium. 2012: 65-72.
- [14] HURTER C, ERSOY O, TELEA A. Graph bundling by kernel density estimation[J]. Computer Graphics Forum, 2012, 31(3): 435-443.
- [15] PEYSAKHOVICH V, HURTER C, TELEA A. Attribute-driven edge bundling for general graphs with applications in trail analysis[C]// IEEE Pacific Visualization Symposium. 2015: 39-46.
- [16] BACH B, RICHEL N H, HURTER C, et al. Towards unambiguous edge bundling: investigating confluent drawings for network visualization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2016, 23(1):541-550.
- [17] BOUTS Q W, SPECKMANN B. Clustered edge routing[C]// IEEE Pacific Visualization Symposium. 2015: 55-62.
- [18] ROSVALL M, BERGSTROM C T. Maps of random walks on complex networks reveal community structure[C]//The National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(4): 1118-1123.

- [19] LIAO Q, SHI L, WANG C. Visual analysis of large-scale network anomalies[J]. IBM Journal of Research and Development, 2013, 57(3/4): 13: 1-13.
- [20] SHI L, LIAO Q, TONG H, et al. Hierarchical Focus+Context Het-erogeneous network visualization[C]//IEEE Pacific Visualization Symposium. 2014:89-96.
- [21] ZINSMAYER M, BRANDES U, DEUSSEN O, et al. Interactive level-of-detail rendering of large graphs[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(12): 2486-2495.
- [22] BENJAMIN B, EMMANUEL P, JEAN-DANIEL F. GraphDiaries: animated transitions and temporal navigation for dynamic networks[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2014, 20(5): 740-754.
- [23] GRIFFEN A L, MACEACHREN A M, HARDISTY F, et al. A comparison of animated maps with static small-multiple maps for visually identifying space-time clusters[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2006, 96(4): 740-753.
- [24] LIN C C, LEE Y Y, YEN H C. Mental map preserving graph drawing using simulated annealing[J]. Information Science, 2011, 181(19): 4253-4272.
- [25] FRISHMAN Y, TAL A. Dynamic drawing of clustered graphs[C]//IEEE Symposium on Information Visualization. 2004: 191-198.
- [26] FISHERMAN Y, TAL A. Online dynamic graph drawing[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(4): 727-740.
- [27] CHE L, LIANG J, YUAN X, et al. Laplacian-based dynamic graph visualization[C]//IEEE Pacific Visualization Symposium. 2015: 69-73.
- [28] KUMAR G, GARLAND M. Visual exploration of complex time-varying graphs[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(5): 805-812.
- [29] JAMES A, STEFFEN H, HEIDRUN S, et al. A modular degree-of-interest specification for the visual analysis of large dynamic networks[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2014, 20(3): 337-350.
- [30] CUI W, WANG X, LIU S, et al. Let it flow: a static method for exploring dynamic graphs[C]//IEEE Pacific Visualization Symposium. 2014: 121-128.
- [31] SHNEIDERMAN B. The eye have it: a task by data type taxonomy for information visualization[C]//IEEE Symposium on Visual Languages. 1996: 336-343.
- [32] KEIN D A. Information visualization and visual data mining[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2014, 20(3): 377-390.
- [33] WARD M O, YANG J. Interaction spaces in data and information visualization[C]//The 6th Joint Euro graphics/IEEE TCVG Symposium on Visualization. 2004: 137-146.
- [34] ROBERT B, GLENN A F, CHRIS N. Home-centric visualization of network traffic for security administration[C]//The ACM Workshop on Visualization and Data Mining for Computer Security. 2004, 55-64.
- [35] FENG K C, WANG C, SHEN H W, et al. Coherent time-varying graph drawing with multifocus+context interaction[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(8): 1330-1342.
- [36] BENJAMIN B B, AARON C, MARY P C, et al. DateLens: a fisheye calendar interface for PDAs[J]. ACM Transactions on Computer-Human Interaction, 2004, 11(1): 90-119.
- [37] TOMINSKI C, ABELLO J, VAN HAM F, et al. Fisheye tree views and lenses for graph visualization[C]//The Conference on Information Visualization. 2006: 17-24.
- [38] VAN-HAM F, VAN-WIJK J J. Interactive visualization of small world graphs[C]//The IEEE Symposium on Information Visualization. 2004: 199-206.
- [39] GANSNER E R, KOREN Y, NORTH S C. Topological fisheye views for visualizing large graphs[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, 20(5): 740-754.
- [40] FRISCH M, HEYDEKORN J, DACHSELT R. Diagram editing on interactive displays using multi-touch and pen gestures[C]//The 6th international conference on Diagrammatic representation and inference. 2010: 182-196.
- [41] SCHMIDT S, NACENTA M A, DACHSELT R, et al. A set of multi-touch graph interaction techniques[C]//ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces. 2010:113-116.
- [42] PROUZEAU A, BEZERIANOS A, CHAPUIS O. Evaluating multi-user selection for exploring graph topology on wall-displays[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2017, 23(8):1936-1951.
- [43] KISTER U, KLAMKA K, TOMINSKI C, et al. GRASP: combining spatially-aware mobile devices and a display wall for graph visualization and interaction[J]. Computer Graphics Forum, 2017, 36(3): 503-514.
- [44] RUFIANGE S, MCGUFFIN M J. DiffAni: visualizing dynamic graphs with a hybrid of difference maps and animation[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2013, 19(12):2556-2565.
- [45] KO S, AFZAL S, WALTON S, et al. Analyzing high-dimensional multi-variate network links with integrated anomaly detection, highlighting and exploration[C]//The IEEE Visual Science and Technology. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2014: 823-825.
- [46] HADLAK S, SCHUMANN H, CAP C H, et al. Supporting the visual analysis of dynamic networks by clustering associated temporal Attributes[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2013, 19(12): 2267-2276.
- [47] DANG T N, PENDAR N, FORBES A G. TimeArcs: visualizing

- fluctuations in dynamic networks[J]. Computer Graphics Forum, 2016, 35(3):61-69.
- [48] ELZEN S V D, HOLTEN D, BLAAS J, et al. Reducing snapshots to points: a visual analytics approach to dynamic network exploration[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2016, 22(1): 1-10.
- [49] DEDE C. Immersive interface for engagement and learning[J]. Science, 2009, 323(5910): 66-69.
- [50] TONG X, LI C, SHEN H W. GlyphLens: view-dependent occlusion management in the interactive glyph visualization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2017, 23(1): 891-900.
- [51] HUANG Y J, FUJIWARA T, LIN Y X, et al. A gesture system for graph visualization in virtual reality environments[C]//IEEE VGTC Pacific Visualization Symposium. 2017: 41-45.
- [52] KWON O H, MUELDER C, LEE K, et al. A study of layout, rendering, and interaction methods for immersive graph visualization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2016, 22(7): 1802-1815.
- [53] CORDEIL M, DWYER T, KLEIN K, et al. Immersive collaborative analysis of network connectivity: CAVE-style or head-mounted display?[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2016, 23(1): 441-450.

[作者简介]



王松（1989-），男，安徽安庆人，中国工程物理研究院博士生，主要研究方向为科学可视化、可视分析。



张野（1994-），男，四川乐山人，西南科技大学硕士生，主要研究方向为网络安全可视化。



吴亚东（1979-），男，河南周口人，博士，西南科技大学教授，主要研究方向为图像图形处理、可视化与可视分析。