可视化视觉隐喻方法综述

郑舜元[1)], 李国政[1)*], 吴愚希[1)], 陆旻[2)], 刘驰[1)], 王国仁[1)]

[1)] (北京理工大学计算机学院 北京 100081)
[2)] (深圳大学建筑与城市规划学院 深圳 518060)
(guozheng.li@bit.edu.cn)

摘 要: 视觉隐喻是一种重要的可视化设计方式, 旨在借助用户熟知的概念呈现复杂数据, 提升用户对于数据的理解分析能力. 随着可视分析技术的发展, 视觉隐喻方法广泛地应用于社交媒体、生物医疗、人机交互等领域. 文中对可视化领域与视觉隐喻的相关工作进行梳理, 总结归纳视觉隐喻中的数据类型以及喻体的隐喻形式; 从视觉隐喻构建方式的角度对现有工作进行分类总结; 对视觉隐喻的不同应用场景及其优势进行概述; 最后展望可视化视觉隐喻方法的未来研究方向.

关键词: 视觉隐喻; 可视化; 可视分析; 可视化设计
中图法分类号: TP391.41 **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.2024-00723

A Summary of Visual Metaphors in Visualizations

Zheng Shunyuan[1)], Li Guozheng[1)*], Wu Yuxi[1)], Lu Min[2)], Liu Chi[1)], Wang Guoren[1)]

[1)] (*School of Computer Science & Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081)
[2)] (*School of Architecture & Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen* 518060)

Abstract: Visual metaphor is a significant method in visualization, which is designed to present complex data through familiar concepts to enhance users' understanding and analytical capabilities. With the development of visual analytics techniques, researchers have widely applied visual metaphor methods in various fields, such as social media, biomedicine, and human-computer interaction. This paper reviews the studies that utilize visual metaphors in the visualization field and summarizes the types of data and the forms of visual metaphors. Then, it classifies and summarizes existing work from the perspective of visual metaphor construction methods and provides an overview of different application scenarios and their advantages of visual metaphors. Finally, it outlines future research directions for visual metaphor methods in visualization.

Key words: visual metaphor; visualization; visual analytics; visualization design

在可视化领域中, 视觉隐喻作为一种重要的可视化设计方式, 对于数据的呈现和传达起着关键作用. 随着数据量和复杂性的不断增加, 传统图形无法充分地满足用户对数据的理解需求. 可视化视觉隐喻通过将抽象或复杂的数据映射到用户熟悉的图像或场景中, 提供更加直观、易于理解的数据呈现方式[1], 增强用户对数据的感知和理解能力, 辅助用户深入地探索数据背后的洞察[2].

收稿日期: 2024-11-30; 修回日期: 2025-06-24. **基金项目**: 2023 年工业互联网创新发展工程——"**工业控制**中间件"项目; 中国科协青年人才托举项目(2023QNRC001); 国家自然科学基金(NSFC 62302038, U2268205); 深圳市科技计划(20231122121504001); 深圳市稳定支持项目(20231122121504001). **郑舜元**(2000—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为数据可视化; **李国政**(1994—), 男, 博士, 助理教授, 硕士生导师, 论文通信作者, 主要研究方向为大数据可视分析; **吴愚希**(2000—), 女, 硕士, 主要研究方向为数据可视化; **陆旻**(1989—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为人机交互; **刘驰**(1984—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 杰出会员, 主要研究方向为大数据与物联网; **王国仁**(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 杰出会员, 主要研究方向为不确定数据管理.

可视化视觉隐喻在诸多领域中具有广泛的应用，已有一些工作针对不同领域的可视化视觉隐喻进行总结归纳. 在数字人文领域，Cruz 等[3]讨论了电影、娱乐中视觉隐喻设计遵循的原则; Gali 等[4]总结了使用隐喻的方法对商业领域中客户的情感进行可视化; Caserta 等[5]讨论了视觉隐喻在软件工程中的应用，如使用城市、地图、流、太阳系等描述软件代码的静态结构及其演变. 在过去的几十年，许多学者尝试对视觉隐喻进行分类. 2006 年，Eppler[1]首次依据视觉隐喻的抽象程度对视觉隐喻进行分类，分为概念图、隐喻图、隐喻模板和隐喻地图 4 个层次，为视觉隐喻提供了一个系统的理论框架，使得研究者和实践者能够更清晰地理解和讨论不同类型的视觉隐喻，以及它们在信息传达和数据可视化中的应用.

Roberts 等[6]从自然物体、人造实体、非实体和可视化启发 4 个方面划分隐喻对象. 然而，上述研究仅仅针对某个特定领域或应用场景，或者某种特定的数据类型. 近年来，尽管有学者在特定领域或角度对视觉隐喻进行了研究，如医学领域可视化的综述[7]，以及从认知语言学角度分析科学信息图中概念隐喻的使用[8]，但目前尚缺乏对视觉隐喻方法的系统收集和整理工作.

为了解决上述问题，本文通过爬虫的方式，系统地收集了 2002 年以来的视觉隐喻工作，包括出版在 TVCG, IEEE VIS, PacificVis, EuroVis, ACM CHI, CGF, ChinaVis, SIGGRAPH ASIA, VizSec 等会议论文集和期刊中的研究成果；然后对收集的论文进行关键词 metaphor 的筛选，在此基础上，根据人工筛选的方式选出与视觉隐喻密切相关的工作，从多个角度进行了归纳整理；最后从视觉隐喻中的数据类型、呈现方式、隐喻的构建方式和视觉隐喻应用 4 个方面，对视觉隐喻进行分类总结. 进一步，本文构建了在线系统 MetaphorVis，展示当前收集的 183 个不同的视觉隐喻(部分论文包含多项视觉隐喻设计)，辅助用户根据不同维度交互筛选与搜索，为研究人员和从业者提供有价值的参考. 从整体看，视觉隐喻研究的数量在不同年份呈现出一定的波动趋势：早期，研究数量较少且增长缓慢；2010 年前后开始逐步增加，并在 2012—2013 年及 2018 年达到阶段性高峰；此后，尽管部分年份有所回落，但整体研究热度仍保持在较高水平. 近年来，尽管直接提出具体视觉隐喻的工作不多，但研究重点有所拓展，如视觉隐喻的设计工具和人工智能对视觉隐喻的生成及理解、视觉隐喻的语言学理解及在科学信息图中的应用等，研究方向呈现出更加多元和深入的发展态势. 当前，视觉隐喻研究正从单一案例研究向更广泛的方法论与技术应用拓展，展现出新的研究趋势.

1　视觉隐喻中的数据类型及隐喻形式

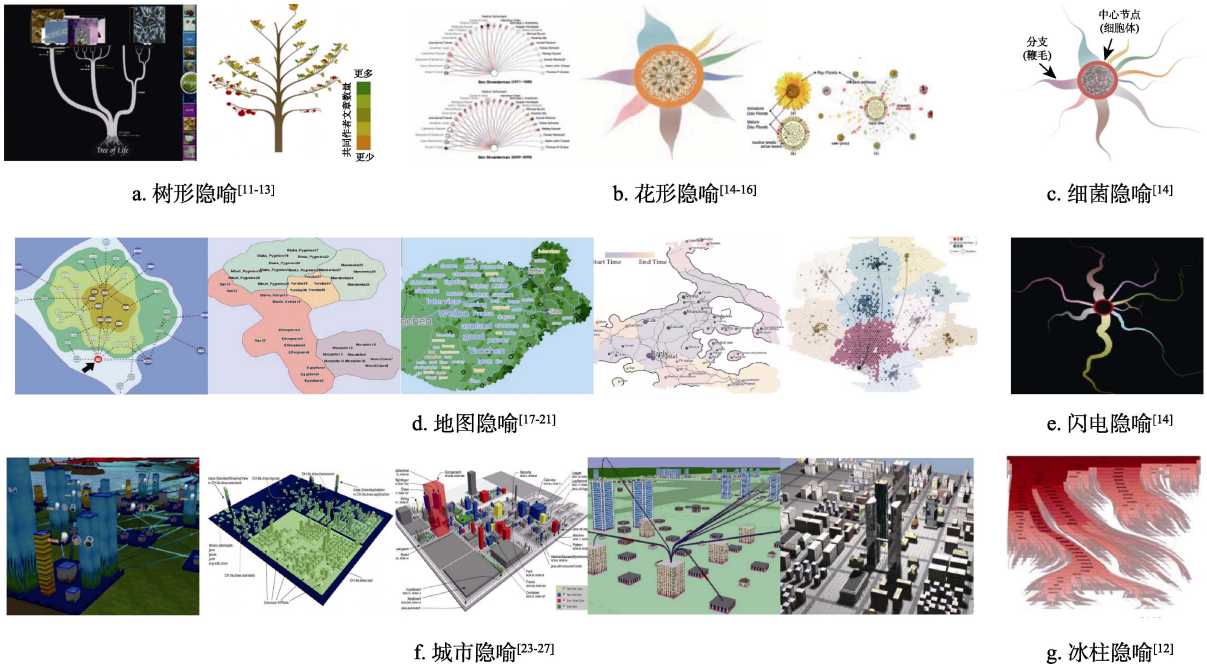
作为视觉隐喻中的本体，原始数据是视觉隐喻中最重要的组成部分. 在构建视觉隐喻的工作中，提升对本体的了解有助于设计者创建更加精确、有意义的数据表示，提高信息的视觉传达效率和用户的解读能力. 本节将从数据类型与隐喻形式的角度对现有视觉隐喻工作进行分类. 对于收集的视觉隐喻工作，从数据本体上可分为关系数据、多维数据、时空数据、场数据和多媒体数据，从喻体类型上可分为实体类、非实体类和动作类型.

1.1　视觉隐喻的数据本体类型

1.1.1　关系数据

层次数据结构反映数据元素之间的嵌套关系，其中一个或多个元素可以包含其他元素. 这种数据结构在自然界和人类社会中普遍存在，如组织结构图、文件系统、网站导航菜单和生物分类等[9-27].

由于层次数据中存在一定的包含与被包含的关系，其在视觉隐喻设计中遵循分类-细分的方式，因此常借用存在分支的形象进行视觉隐喻设计. 树是一类很常见的隐喻形式，如图 1a 所示，树及树的变体[9-10]具有层次结构的形态，因此很适合表达具有层次、拓扑结构的数据. 这些数据可能具有父子或传播关系，Block 等[11]用“生命之树”的形象进行博物馆展览系统中的物种分类可视化; van de Wetering 等[12]提出一种基于冰柱隐喻的空间回收冰柱图用于生物分类，有效地避免了传统冰柱图中的空间浪费，如图 1g 所示. 然而，传统的树形与冰柱隐喻仅能表现数据间的关系，无法展示个体的其他属性. 为了解决此问题，研究者提出了许多新的视觉隐喻设计方式. Fung 等[13]通过树的形象展现个人在学术领域上的成果，并采用树干、树枝、叶片与果实等要素表示该作者发表论文的数量、合作关系和具体论文等；利用细菌[14](如图 1c 所示)[14]、花(如图 1b 所示)[14-16]、闪电(如图 1e 所示)[14]等具有分支结构的物体进行视觉隐喻设计，将数据集中的主要类别放在中心节点，相关的类别分布在分支(花瓣、鞭毛)上，实现对疾病、市场研究数据的可视化.



a. 树形隐喻[11-13] b. 花形隐喻[14-16] c. 细菌隐喻[14]

d. 地图隐喻[17-21] e. 闪电隐喻[14]

f. 城市隐喻[23-27] g. 冰柱隐喻[12]

图 1 关系数据中的视觉隐喻

图/网络数据结构指具有网络拓扑结构信息的数据，用图形式的结构表达，数据之间不像层次数据那样只在父子节点间有联系，而是任意 2 个节点之间都可能有联系，如人际关系、社交媒体消息传播与转发等，都是具有网络拓扑结构的数据. 由于其数据结构的特性，在设计视觉隐喻时常常与地图联系起来，如图 1d[17-21]所示. 2006 年，Cortese 等[17]利用地图隐喻展示互联网层次结构，并通过等高线进行不同层次的划分；Hu 等[18]设计了一种地图隐喻，用于可视化地表示 DNA 样本集的作者合作网络，其中，节点表示实体(DNA 样本或作者)，边表示实体间的关系(DNA 相似性或合作关系).

尽管社交媒体数据在格式上属于非结构化的文本数据，但用户间的关注、消息的传播与转发关系遵循严格的图/网络数据的结构. 地图隐喻在社交媒体分析中尤为常见，用于展示社交媒体中消息的传播方式，并通过地图中各类元素展现社交媒体数据中的不同方面[21]. 例如，利用地图中的城市、湖泊等表示社交媒体中的关键词和消息，通过河流、路线和桥梁表示信息传播的不同路径和关系. 这些方法将时间、用户行为、情感倾向等多维数据转换为地图上的视觉元素，如颜色、大小、形状和位置，便于用户从视觉上识别和理解这些数据的模式和趋势；并提供时间轴或动画功能，支持用户观察信息在不同时间段内的扩散和演变. Dou 等[22]将地图、词云与事件流的形式相结合，实现了对新闻和社交媒体事件的交互式可视化分析. 通过利用地图视觉隐喻，支持非专业用户直观地理解和分析社交媒体数据.

除了二维结构的地图隐喻外，三维城市模型[23-27]也是一种常见的隐喻. 如图 1f 所示，三维城市模型中每个软件组件(如类、模块、函数)可被表示为一个建筑，建筑的类型(如住宅楼、商业大厦、摩天大楼)可表示组件的不同特性，如代码行数、复杂性或在系统中的重要性. 软件组件之间的关系可通过城市中的街道、小巷或桥梁表示，如函数调用关系可用街道连接不同的建筑表示，而类之间的继承关系可以用不同层级的建筑或建筑群表示. 在城市模型中，车辆流量可以模拟软件组件之间的通信流量，交通的繁忙程度可以反映组件之间交互的频繁程度，交通的流向可以表示数据或控制流的方向；城市中的不同区域或社区可表示软件系统中的模块或包；社区内的建筑群表示该模块内紧密相关的组件，而社区之间的边界可以表示模块间的接口. 因此，整个城市布局可以提供一个宏观视角，展示软件系统的总体结构. 通过这种三维城市模型的视觉隐喻，软件架构的数据不仅被转换成直观的图形表示，而且可以通过空间化的方式探索和分析，便于软件工程师和维护人员更快速地识别关键组件、理解组件间的关系.

自然元素也被应用于图/网络数据可视化的隐喻设计. Shin 等[15]设计了一种名为 Influence Flower 的新视觉隐喻，以花的形式揭示个人、项目、机构、会议和期刊等学术实体之间的相互影响，展示学

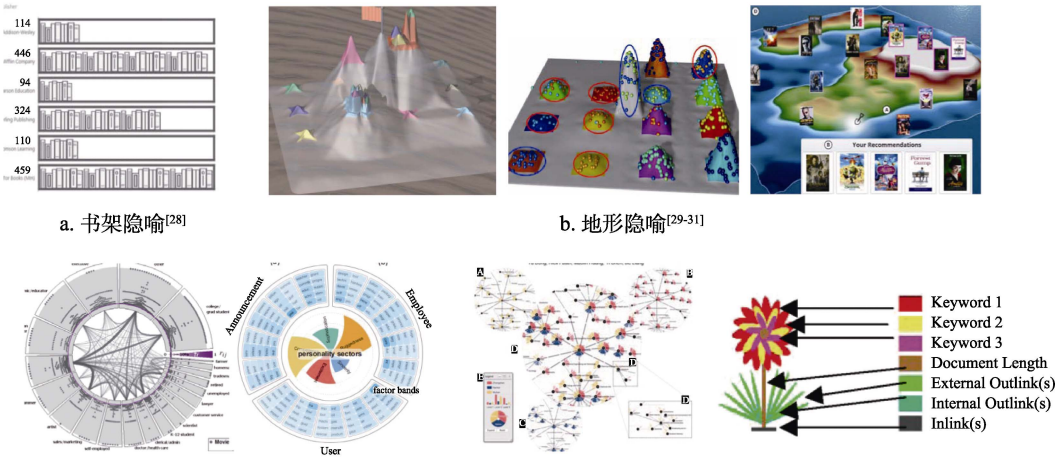
术实体之间的影响力流动；同样地，Whisper 系统[16]采用花的隐喻将花芯(主题)和花瓣(扩散路径)形成一个中心辐射的布局，表示信息通过社交媒体用户转发推文的传播路径，花瓣的方向和布局象征着信息从中心向外的传播过程．花的视觉隐喻不仅展示了数据的静态结构，还能够动态地展示数据随时间的变化，如信息传播的速度和方向，或学术影响力的增减；同时，整合了多个维度的数据，如时间、空间、情感倾向和影响力强度等，为用户提供一个全面的数据视角．

1.1.2　多维数据

多维数据本质上是一种高度结构化的信息形式，通过在不同维度上进行分类和组织，将各种相关属性和特征联系起来．这种数据的组织方式支持用户同时考虑多个方面的信息，如时间、地理位置和产品类别等，更全面地理解数据所表达的含义．与传统的单一维度数据相比，多维数据包含的信息更丰富，能够提供更细致和全面的分析视角[28-35]．

二维数据通常以表格形式出现，与高维数据相比，表格数据更简单直观．信息图形创建工具 InfoNice[28]允许用户将普通的图表转换成包含多种视觉元素的信息图形．利用该工具将不同出版商的出版物隐喻为书架这一形象，通过书籍的图像构成图表的条形和柱状部分，形象地展示每个出版商的出版物数量，如图 2a 所示．

进行多维数据可视化时，如何将较高维度的数据进行直观地表示是一个挑战，通常使用降维技术将高维数据映射到二维或三维空间．拓扑地形是一种将数据映射至三维空间常见的喻体类型，如图 2b 所示．使用地形隐喻的目的是保留数据的拓扑特征，即在降维过程中数据的关键特征，如临界点、功能跨度(持久性)等都被保留在最终的地形表示中．地形隐喻允许数据的层次性或嵌套结构以地形的高低起伏表示，同时还可以将其他属性(如体积、密度等)集成到地形隐喻中，提供更丰富的数据表示．此类方法还支持用户通过交互进一步揭示数据特性，如通过调整视图、选择特定的数据点或区域进行深入分析．通过地形隐喻，可以将复杂的多维数据集转化为直观的三维地形图，帮助用户更好地把握数据的全局结构和关键特征．



a. 书架隐喻[28]　　b. 地形隐喻[29-31]

c. 轮子隐喻[32-33]　　d. 花形隐喻[34-35]

图 2　多维数据中的视觉隐喻

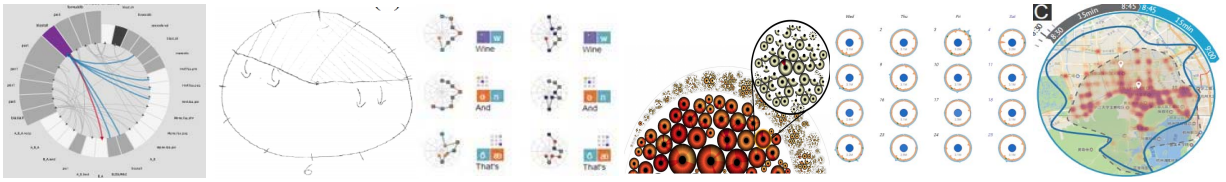
多维数据的二维表示中使用的隐喻种类较丰富，包括现实中存在的轮、花和乐谱这类抽象表示．以轮的隐喻为例，轮由多个扇区组成，每个扇区可以表示多维数据中的一个维度或类别，这种分割支持用户直观地查看和比较不同维度的数据，扇区大小或半径长度可以与数据的量化值相关联，从而在视觉上传达数据的大小或重要性．Alsallakh 等[32]在大型列联表的可视化中采用轮的视觉隐喻，使用环形图的扇区表示列联表的行类别，并通过径向位置上的直方图表示行与列之间的关联强度，如图 2c 所示；可视化工具 SocialBrands[33]能够展示品牌的多维个性特征，品牌个性的不同维度通过轮状图的不同扇区表示，每个扇区的大小表示该维度的强度，2 个品牌之间的相似性和差异则通过轮状图中扇区的相对位置和大小表示．

与车轮的扇区类似，花瓣也常被用于表现数据属性．可视化工具 PansyTree[34]利用三色堇展现多维数据，每朵花表示一个数据节点，而花瓣的颜色区分不同维度的数据，使用花瓣的高度表示属性值，如图 2d 所示；Chau[35]利用花的组成部分对

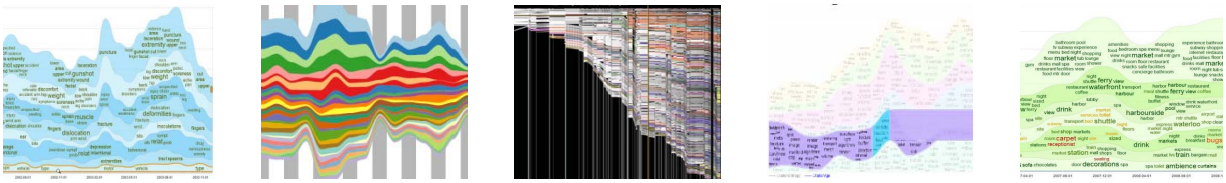
网络搜索数据进行可视化，例如，花瓣表示关键词数量，面叶子表示出站链接数量，茎表示文档长度，而花的支撑地表示入站链接数量. 花的结构允许表示多个属性而不会过于复杂，同时也保持了图形的美观和吸引力.

1.1.3 时空数据

时间序列数据是一种按照时间顺序记录的数据集合，显示某个变量在连续或离散的时间点上的变化情况. 图 3a 和图 3b 展示了由时间序列数据作为本体的多项视觉隐喻工作[36-46]. 在时间序列的可视化中，使用时钟隐喻是一种常见的方法[36-41]，该隐喻能够直观地将时间信息映射到视觉元素上，便于用户理解和分析，如图 3a 所示；时钟的圆形特征表示时间序列数据，时钟隐喻可以结合其他数据维度，通过不同的视觉通道(如颜色、线宽或标记)展示更多信息. 文献[39]结合了圆形树图和时钟状的图形，每个图形表示 24 h 的时间序列，颜色表示数据值的大小，如网络流量，通过颜色的变化可以直观地展示不同时间段的流量变化.



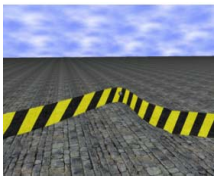
a. 时钟隐喻[36-41]



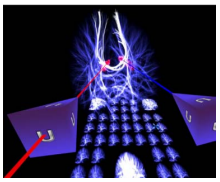
b. 流式隐喻[42-46]



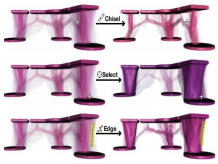
c. 虚拟桌面隐喻[47]



d. 障碍带隐喻[48]



e. 刷子隐喻[49]



f. 雕刻隐喻[50]

图 3 时空数据中的视觉隐喻

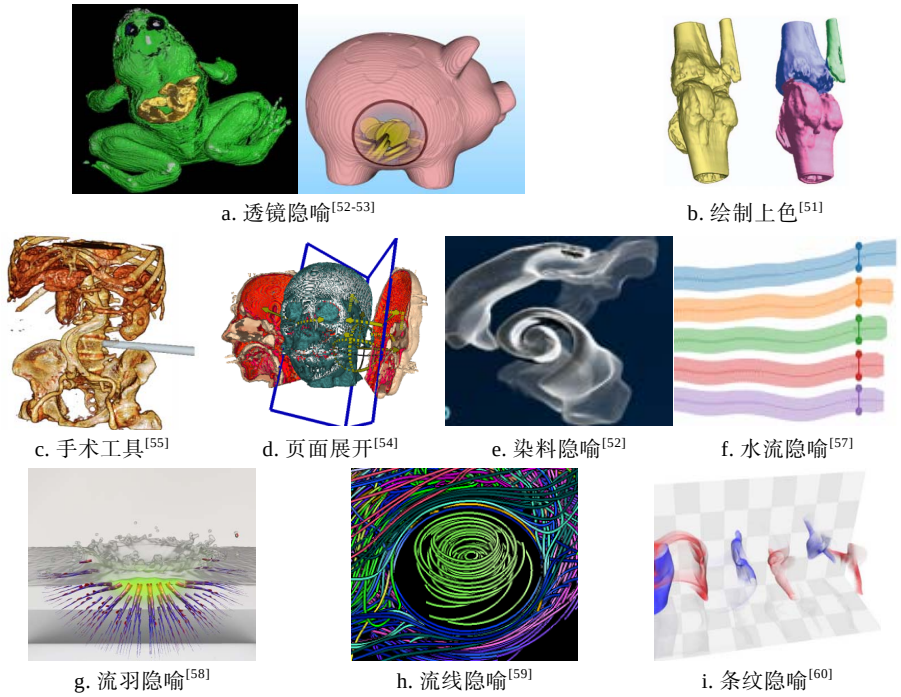
已有许多聚焦于数据在时间推移中的发展变化趋势的工作，如社交媒体、文本等消息随时间推移的演变过程. 这类工作通常采用流的隐喻表现相关数据在时间轴上的变化过程[42-46]，通过连续的线条或流动的形状，直观地表示文本数据随时间的变化，便于用户快速地把握时间序列数据的动态变化，如图 3b 所示. 通过河流的分支和合并，可以形象地展示文本中主题的生成、发展、衰退以及主题间的关系，如合并和分裂. 同时，流可以揭示不同文本主题之间的联系. 例如，通过观察河流的汇合点，用户可以理解相互关联或者有共同起源的主题；通过流的宽度或颜色的变化，可以突出显示文本数据中不同部分的重要性，如关键词的出现频率或主题的活跃度. 由于人们对于流本身具有直观的理解，因此这种隐喻可以帮助用户更好地记忆和理解数据的模式.

空间数据的隐喻集中在虚拟空间的交互操作中. 现实世界中，物体和人们对环境的直觉性理解常被转化为虚拟环境中的交互手段[47-50]. Wagner Filho 等[47]提出 VirtualDesk 隐喻，在用户视野中构建一个虚拟重现的物理工作桌，通过自然的手势与空中数据表示进行交互，如图 3c 所示；在虚拟空间中，The magic barrier tape[48]利用警示带的隐喻增强用户在虚拟环境中的导航体验，如图 3d 所示. 还有一些工作聚焦于对虚拟环境中用户的行为进行隐喻设计. Hurter 等[49]将控制器的操作隐喻为刷子，支持用户与三维轨迹交互，提取并洞察它们的相似性和空间配置，如图 3f 所示；或将用户操作的光标隐喻为使用凿子雕刻[50]，通过点击虚拟环境中的模型来实现“雕刻”的操作，如图 3f 所示. 这类视觉隐喻允许用户以一种近似于物理世界的直观方式进行操作和探索，降低了操作门槛.

1.1.4　场数据

场数据是一种描述在连续空间内分布的属性或现象的数据类型[51-57]，已广泛地应用于多个领域. 场数据的核心是提供一个空间框架，表示和分析在该空间内属性的分布和变化，主要包括体数据与流数据，描述空间分布的属性或现象，属于在特定类型或应用场景下的场数据.

体数据的操作聚焦交互式操作，如图 4 所示视觉隐喻设计包括对体数据的绘制上色[51]、透镜观察[52-53]、页面展开或扇形展开[54]，以及利用手术工具操作医学成像数据等[55]. 这些方法都强调用户与体数据之间的交互性，允许用户通过直观的操作探索和分析数据；并且通过视觉隐喻区分数据的焦点区域和上下文信息，支持用户在关注细节的同时保持对整体结构的认识. 流场数据的可视化中，视觉隐喻设计通过模拟自然现象(如染料[56]、水流[57]、羽毛[58])，或使用直观的几何形状(如流线[59]、条纹[60])进行多维度的信息展示，包括流场的方向和速度，还可能涉及时间变化、涡旋结构和扩散过程等多维度信息等，为用户提供了全面的流场特征视图.



a. 透镜隐喻[52-53]　b. 绘制上色[51]　c. 手术工具[55]　d. 页面展开[54]　e. 染料隐喻[52]　f. 水流隐喻[57]　g. 流羽隐喻[58]　h. 流线隐喻[59]　i. 条纹隐喻[60]

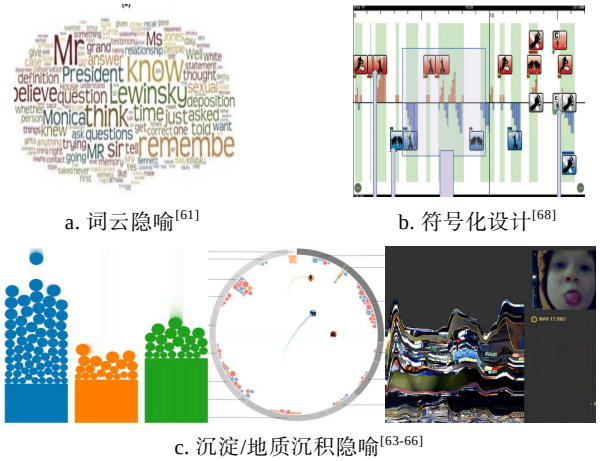
图 4　场数据中的视觉隐喻

1.1.5　多媒体数据

多媒体数据指以多种媒体形式呈现的信息，涵盖文本、图像、音频和视频等类型，通常不依赖于固定格式或特定数据模型. 本文收集的视觉隐喻工作聚焦于文本、音频和视频数据的可视化[61-70].

词云[61-62]作为一种视觉隐喻，在多媒体数据，尤其是文本数据可视化中具有独特的特征和作用. 如图 5a 所示，不同大小的字体表示单词在文本中的频率，字体越大，表明该单词出现的次数越多；不同的颜色赋予词汇情感色彩或用于区分词汇的不同类别，并且可以设计成各种形状，如常见的矩形和圆形，或更复杂的自定义形状，以增强视觉效果或传达特定含义，通常采用螺旋线算法等进行单词排布，以避免重叠并优化空间利用率.

为了表现多媒体数据随时间演变的趋势，许多



a. 词云隐喻[61]　b. 符号化设计[68]　c. 沉淀/地质沉积隐喻[63-66]

图 5　多媒体数据中的视觉隐喻

工作采用动态演变的过程进行隐喻设计. 沉积过程是一种重要的隐喻形式，Visual Sedimentation[63]用

物理沉积模拟时间序列数据流的可视化，如社交媒体消息生命周期内的演变，使用该隐喻，有意义的数据块被可视化为视觉元素，其在落到地面时保持悬浮状态，受到虚拟引力而移动，随后堆积在地面上腐烂，最后絮凝成聚集的区域，如图 5c 所示；与传统的纵向沉积不同，ConToVi[64]采用圆形布局以及径向方向的沉淀表现政客的发言在话题空间中沉积的过程，圆形中每个扇区表示一个文本中的主题，且扇区的长度与其表示主题的大小成比例，沉积物的大小表示发言的文本长度，颜色则通过文本的特定特征，如礼貌度、情感分数和确定性等进行映射．BioVistory 系统[65]能够从人物传记文本中提取出关键事件，并将其划分为不同的人生阶段，如职业生涯、人际关系等．随后，利用“藤蔓”这一视觉隐喻，将这些事件和阶段以连贯的方式可视化，形成类似藤蔓缠绕生长的图形结构，直观地展现人物生平的演变过程．

在视频/音频的可视化设计中，如何区分并展示各时段内的主题与要素是一项重要工作，相关研究常利用时间轴表现相关数据的进度，并对时间轴进行划分．Conversation Clock 工具[67]在处理群体对话中的音频输入时，将音量贡献映射为沿着圆形时间轴的矩形条，形成一个视觉上的“时钟”，其中，条形表示参与者在特定时间段内的语音贡献，并将不同发言以层叠的同心圆展示，形成多个时钟的嵌套；MatchPad 系统[68]在体育比赛视频的时间轴上使用具有隐喻性视觉提示的图形表示事件，支持用户无需观看完整的比赛视频，即可通过时间轴上的提示对比赛的关键时刻、战术执行、球员表现等有直观的了解，如图 5b 所示．VideoForest 系统[69]采用森林隐喻的设计，通过将视频的关键帧和相关的弹幕评论可视化为树状结构，帮助用户更好地理解视频内容及其观众的反映；将视频中一系列连续且相关的片段表示为生长在视频时间线上的场景树，每棵树的根部表示与视频内容相关的弹幕评论，树的高度与在相应时间窗口内发布的弹幕数量成正比，支持用户直观地识别视频的高潮和重要场景．该隐喻将非结构化的视频与文本数据(弹幕)结合，同时区分视频各时段内的主题，且避免了弹幕的信息冗余．为了避免长时间视频中的信息过载问题，AlVis 系统[70]提供一种快速预览特定时间点视频材料的方式，采用胶片放映机的隐喻，用户可以通过类似移动胶片帧的操作移动光标，查看不同时间点的视频内容．

1.2 视觉隐喻的喻体类型

视觉隐喻映射形式丰富多样，不同的喻体与数据类型之间存在一定的映射关系．本节从喻体角度出发对视觉隐喻进行分类，根据喻体的特点，将视觉隐喻划分为实体、非实体和动作 3 种类型．实体类型依赖于现实物体的直观特性；非实体类型通过虚拟物体或抽象概念、符号表达数据特性；而动作类型常结合交互方式或动态变化，利用信息呈现的过程增强用户对信息的理解与探索．

(1) 实体类型．指现实世界中具有物理形态的物体，包括自然实体和人造实体．自然实体如树、山脉和河流等，常用于隐喻数据的层次结构、时空变化或数值分布．例如，树的年轮可表现时间累积，山脉起伏可表示数据的高低对比．人造实体如地图、城市和钟表等，通常用于表达复杂系统的数据关系．例如，地图隐喻用于关系数据可视化，以地理信息展现元素间的关联；三维城市模型则通过建筑结构反映系统层级．

(2) 非实体类型．指无具体物理形态的概念或感官体验，包括抽象概念、信息符号及启发式可视化设计．抽象概念如天气、光线和磁场等自然现象，以及 X 射线和雷达图等信息表达方式，利用用户对日常认知的理解表现数据特性；信息符号如箭头、条纹和色彩渐变等，被广泛用于表示方向、趋势或数据类别；启发式可视化通过创造性的视觉元素引导用户探索数据，而非直接映射现实对象．OpinionSeer[71]中提出的“意见三角”和“意见圆环”，利用几何形状映射用户情感倾向和数据关联；MatchPad 系统[68]采用视觉提示帮助理解视频事件；Jin 等[72]通过连环画隐喻增强时间数据的可读性：这些隐喻虽然无固定形态，但是能够激发用户联想，使信息更易于感知和解读．

(3) 动作类型．该类隐喻侧重于动态变化，通常与用户交互紧密相关，其将可视化操作映射到熟悉的现实动作或自然现象，如抓取、拖拽、放大等，使数据探索更加直观．VirtualGrasp[73]允许用户通过“抓取”手势在虚拟环境中检索对象，而“透镜观察”类隐喻则用于放大数据细节．此外，一些隐喻借助自然现象模拟数据变化，例如，以沉淀模拟数据积累[61]，或通过径向扩散表现信息传播[63]，通过过程展现增强了数据交互的直觉性和趣味性．

值得注意的是，在不同场景下，同一种隐喻的呈现形式也会发生变化．例如，对于时钟隐喻，Conversation Clock 系统[67]处理非结构化的音频数据时，将不同声源音量贡献映射为沿着圆形时间

轴的矩形条，形成一个视觉上的时钟；HomeFinder Revisited[41]在圆形视窗外侧加入了类似时钟的时刻设计，支持用户通过拖拽以改变时间，可以呈现视窗内不同时段的展示效果.

在不同应用场景下，同种类型数据也会采用不同的视觉隐喻设计. 设计者关注社交媒体数据的文本内容出现频次时，常采用词云的隐喻设计，突出展示关键信息，侧重展示社交媒体作为非结构化文本数据的特性. 在呈现媒体消息随时间流的传播变化时，通常采用河流的视觉隐喻，方便用户了解消息及时间随时间推移的传播情况，侧重于展现社交媒体数据作为时空数据的特性. 展示用户间的关注、消息的传播与转发关系时，由于数据中存在严格的图/网络结构，因此常采用地图的隐喻设计展示数据间的关联关系.

本节探讨了视觉隐喻在不同数据类型中的应用和设计方法，通过对关系数据、多维数据、时空数据、场数据及多媒体数据的视觉隐喻进行分类和分析，揭示各种数据类型在视觉隐喻设计中的特定需求和挑战.

2　视觉隐喻的构建方式

由于可视化包含数据可视化与交互的过程，因此在视觉隐喻设计中也会有相应的侧重. 本文基于它们在设计和用户体验中的不同作用，将视觉隐喻分为“形式隐喻”和“交互隐喻”. 形式隐喻强调视觉隐喻的静态呈现，关注其表现形式；而交互隐喻则侧重于动态的交互过程，强调用户的参与度. 这种分类方法在设计实践中被广泛采用，旨在帮助设计师更有效地应用隐喻，提高用户体验.

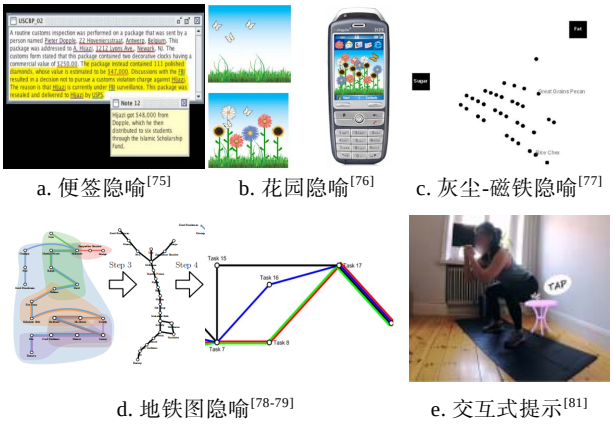
2.1　形式隐喻

形式隐喻关注视觉元素的外观设计，通过视觉符号、色彩、形状和布局等元素传达隐喻性的信息，目的是加强用户对于数据的理解[74-80].

形式隐喻的构建方式侧重于视觉表现或数据映射. 一类隐喻依赖直观的视觉元素传达概念、情感或信息，不涉及数据的呈现与复杂的数据处理，常采用艺术设计的方式进行构建；另一类形式隐喻则涉及数据的映射与表达，需要考虑数据的属性特征，确保隐喻能够准确地传达数据背后的信息和关系，其中，隐喻的本体即数据称为数据空间，喻体即隐喻的展现形式称为概念空间. 视觉隐喻的目标是将数据映射到概念上，数据空间中的关系保存在概念空间中. 创建一个隐喻的关键因素是确定映射应该保留的关系. 参照 Tkachev 等[74]的工作，根据数据和隐喻映射形式的结构，将其分为基于距离的、基于属性的、基于拓扑结构的和混合的隐喻构建方式.

2.1.1　艺术设计

艺术设计方式构建视觉隐喻的方法侧重于创意表达和审美价值，利用视觉元素的直观特性传达更深层的含义而不涉及数据本身的特性. Andrews 等[75]采用了“便签”隐喻，支持用户在便签中编辑文字，并将其粘贴到文档中随着文档移动，便签也可以作为区域的标签粘贴到背景上，或者作为独立文本存在，如图 6a 所示；Consolvo 等[76]提出 UbiFit Garden 系统进行用户体育活动的监测，使用一个花园视觉隐喻，其花园随着用户进行体育活动而逐渐开花，当用户达到每周目标时，显示屏的右上角出现一只大的黄色蝴蝶，较小的白色蝴蝶表示最近达成的目标，用于奖励并提醒用户过去的成功，如图 6b 所示.



a. 便签隐喻[75]　b. 花园隐喻[76]　c. 灰尘-磁铁隐喻[77]

d. 地铁图隐喻[78-79]　e. 交互式提示[81]

图 6　不同构建方式的视觉隐喻

2.1.2　基于距离的隐喻构建方式

基于距离的构建方式，2 个空间中都有一个距离函数，量化了点的成对相似性；然后计算一个旨在保持距离的离散分配，即数据空间中点之间的距离应该尽可能地接近它们分配的概念之间的距离. 在这种映射下，用户可以比较概念探索数据中的成对相似性，还可以形成相关的数据-概念对组. Yi 等[77]使用灰尘-磁铁的关系隐喻数据点之间的分布和相似性，其中，数据点之间的相似性通过距离表达；而概念空间中，磁铁对灰尘的吸引力以及灰尘之间的聚集或分散也通过距离表达，如图 6c 所示. 同样地，在通过地图隐喻进行社交媒体消息传播的构建过程中，也需要考虑信息在社交网络中的传播距离和传播范围，形成地理上的邻近关系，

从而隐喻社交网络中信息传播的“邻近性”.

2.1.3 基于属性的隐喻构建方式

基于属性的视觉隐喻构建方式是一种将数据的属性特征与视觉元素的属性特征相匹配的技术, 适用于具有直接可解释属性的数据. 与基于距离的映射不同, 属性映射指定了数据与概念的相似性. 例如, 使用城市隐喻代码软件结构的任务中, 代码依据自身含义映射至城市的各类建筑中, 如中心广场、居民住宅和图书馆等; 代码的各类属性由建筑物的视觉特征进行表现.

2.1.4 基于拓扑的隐喻构建方式

基于拓扑结构的映射保留了数据原本具有的拓扑结构, 尤其适用于带有网络或层次结构的数据, 在映射的过程中, 可视化根据数据之间的连接关系构建. 例如, 利用“生命之树”或“冰柱”隐喻展示生物的分类, 或利用地铁路线图的隐喻展示数据之间的关联关系等[78-80], 如图 6d 所示.

视觉隐喻的设计中可能涉及多种构建方式, 例如, 在使用地图隐喻社交媒体消息的传播中, 除了数据之间的距离, 一些其他要素, 如颜色、某地点的大小等信息也会被用于表示数据的不同属性. 当隐喻构建方式涉及 2 种或以上时, 将其称为混合式的隐喻构建方式.

2.2 交互隐喻

在视觉隐喻领域中, 交互隐喻表示一种特殊的设计方法, 侧重于用户与视觉元素之间的互动体验, 其核心是创造动态的视觉元素, 这些元素能够响应用户的行为并提供即时反馈, 增强用户的交互过程. 形式隐喻通常依赖静态的视觉映射和明确的隐喻对象, 而交互隐喻则超越了这种直接的映射关系, 转而关注用户交互行为的隐喻化表达.

Semeraro 等[81]通过整合多种视觉提示, 如方向性提示、身体高亮显示和视觉隐喻, 为力量训练教学视频提供指令, 不仅实现了视觉上的指导, 还通过隐喻的方式, 使得用户能更直观地理解和执行复杂的训练动作, 如图 6e 所示. 此设计策略不是简单地将一个视觉对象映射到另一个对象, 而是将一系列的交互动作和操作转化为易于理解和操作的视觉隐喻.

交互隐喻的设计目标是创造出一种直观的交互体验, 使得用户能够通过直觉操作和理解复杂的系统, 这种隐喻化的交互不依赖于具体的隐喻映射对象和隐喻映射形式的对应关系, 而是通过对用户交互行为的深刻理解, 将这些行为转化为一系列动态的视觉元素和反馈机制. 因此, 交互隐喻的设计更多地依赖于对用户行为的洞察和对交互流程的创新, 而不是固定的构建方式.

2.3 形式隐喻与交互隐喻的区别

(1) 在构建方式上存在本质的区别. 在隐喻设计的动态性与灵活性上, 形式隐喻更多地关注静态的视觉表现, 其构建方式围绕着如何将数据结构映射到视觉元素的外观和布局上. 由于映射关系通常是预定义的, 因此形式隐喻有更明确的构建方式, 而交互隐喻强调用户与系统、数据之间的动态交互, 在设计时更多地考虑灵活性和适应性, 不是通过某些固定构建方式与特定数据绑定.

(2) 在用户参与度方面也有显著不同. 交互隐喻中, 用户的行为常直接影响隐喻的呈现效果. Semeraro 等[81]通过用户的动作给予不同的隐喻提示, 指导用户的锻炼行为, 要求设计者更多地关注用户交互的逻辑和反馈机制, 而不是固定的构建方式. 在形式隐喻中, 用户的角色更多的是观察者而非参与者. 尽管一些形式隐喻提供了部分交互操作, 但隐喻设计本身还是基于设计者预先定义的视觉元素和数据的映射关系, 用户仍然需要通过观察这些视觉元素来理解数据.

(3) 交互隐喻中的数据绑定通常更复杂, 由于系统需要处理用户交互带来的数据变化, 因此在用户进行操作时, 可视化需要动态地更新以反映新的数据集, 这种动态的数据绑定使得交互隐喻难以遵循单一的构建方式.

(4) 在设计方面, 部分交互隐喻将对系统的某项操作隐喻为现实中的某类动作或对某类工具的使用, 由于本身并不存在数据本体, 因此无法实现与形式隐喻类似的数据-视觉元素绑定操作.

总体上, 交互隐喻的设计和实现更多地依赖于用户交互的逻辑和动态数据的处理, 而不是固定的构建方式. 这种设计使得交互隐喻能够更好地适应用户的探索行为和数据的变化, 但也意味着在设计和实现上需要更多的灵活性和适应性.

3 视觉隐喻的应用场景

本文对收集的视觉隐喻相关工作进行应用场景的划分, 包括生物医疗、学术、科学实验、电子信息、人机交互、数据分析、社交媒体、市场分析、地理分析和数字人文等领域, 其中, 较多的工作集中在生物医疗、社交媒体与数字人文领域.

在生物学方面, 视觉隐喻主要聚焦于生物分类和生物基因分析等. 在医学方面, 主要涉及对医

学模型的交互式操作；也有一些工作利用增强现实技术帮助医生进行手术操作的提示[82]，使用交通灯颜色隐喻和不同的缩放方法帮助医生识别操作偏差. 在社交媒体分析中，视觉隐喻设计采用地图与流 2 种方式：地图隐喻展现消息的传播路径，揭示社交媒体中心信息扩散的方式；流的隐喻展现社交媒体数据中的事件如何随时间发展及其相互关系. 数字人文领域则包含社会与艺术等相关议题，例如，用跷跷板隐喻社会网络中成对关系的变化和不平衡性[83]；借用三维地形的隐喻进行电影推荐[31]，通过地形的高度表示用户对项目的偏好程度.

值得注意的是，许多工作并不专门针对某个特定领域，而是提出一套工具，针对不同类型数据进行可视化分析，如通过平行集、平行坐标等表现多维数据，使用树的隐喻展现层次化数据.

4　视觉隐喻工作总结

本文所提及的视觉隐喻相关工作如表 1 所示. 此外，还构建了在线系统 VisMetaphor①，更为全面地收录了视觉隐喻相关工作，旨在为研究人员和从业者提供有价值的参考和启发. 图 7 结合了笛卡儿坐标系热力图(颜色越深的格子代表当年该类视觉隐喻工作数量越多)与柱状图对系统中所收集的工作进行了总结. 展示了各年份的视觉隐喻工作在隐喻类型、喻体类型和本体类型 3 个维度上的统计数量.

表 1　视觉隐喻可视化总结

文献	隐喻类型	构建方式	映射种类	数据类型	应用场景	出版年
[73]	交互隐喻	交互设计	手势动作		人机交互	2018
[75]	形式隐喻	艺术设计	便利贴		人机交互	2013
[81]	交互隐喻	艺术设计	指导性符号		人机交互	2022
[29]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	拓扑地形	场数据	科学实验	2007
[48]	交互隐喻	交互设计	障碍带	场数据	人机交互	2009
[50]	交互隐喻	交互设计	雕刻动作	场数据	人机交互	2018
[51]	交互隐喻	交互设计	绘画	场数据	生物医学	2005
[52]	交互隐喻	交互设计	透镜	场数据	生物医疗	2005
[53]	交互隐喻	交互设计	透镜	场数据	生物医疗	2006
[54]	交互隐喻	交互设计	页面展开	场数据	生物医疗	2003
[55]	交互隐喻	交互设计	手术工具	场数据	生物医疗	2006
[56]	交互隐喻	交互设计	染料平流	场数据	科学实验	2008
[57]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	流	场数据	科学实验	2021
[58]	形式隐喻	混合(属性、拓扑、距离)	流羽(流矢、飞箭)	场数据	科学实验	2015
[59]	交互隐喻	交互设计	透镜观察	场数据	人机交互	2015
[60]	形式隐喻	混合(属性、距离)	烟雾条纹	场数据	科学实验	2008
[61]	形式隐喻	混合(属性、距离)	云	多媒体数据	数据分析	2009
[66]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	地质沉积	多媒体数据	数字人文	2004
[68]	形式隐喻	艺术设计	图形符号	多媒体数据	数字人文	2012
[69]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	树	多媒体数据	数字人文	2016
[70]	形式隐喻	艺术设计	电影胶片	多媒体数据	数据分析	2012
[71]	形式隐喻	拓扑	意见三角形	多媒体数据	数据分析	2010
[28]	形式隐喻	属性	书架	多维数据	数据分析	2018
[30]	形式隐喻	混合(属性、拓扑、距离)	地形图	多维数据	学术	2010
[31]	形式隐喻	混合(属性、拓扑、距离)	地形图	多维数据	数字人文	2017
[32]	形式隐喻	混合(拓扑、距离)	轮子	多维数据	数据分析	2012
[76]	交互隐喻	艺术设计	花园	多维数据	人机交互	2008

① https://metaphorvis.github.io/VisMetaphor

续表

文献	隐喻类型	构建方式	映射种类	数据类型	应用场景	出版年
[77]	形式隐喻	距离	灰尘与磁铁	多维数据	数据分析	2005
[82]	交互隐喻	属性	交通灯	多维数据	生物医疗	2019
[35]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	花	多维数据/多媒体数据	数据分析	2011
[34]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	花/树	多维数据/关系数据	数据分析	2020
[27]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	城市	多维数据/时空数据	电子信息	2003
[41]	形式隐喻	属性	时钟/地图	多维数据/时空数据	数据分析	2018
[45]	形式隐喻	混合(属性、拓扑、距离)	流	多维数据/时空数据	学术	2016
[11]	形式隐喻	拓扑	树	关系数据	生物医疗	2012
[12]	形式隐喻	拓扑	冰柱	关系数据	生物医学	2020
[13]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	树	关系数据	学术	2016
[14]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	细菌、花、闪电	关系数据	生物医疗	2018
[15]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	花	关系数据	学术	2019
[17]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	地图	关系数据	电子信息	2006
[18]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	地图	关系数据	数据分析	2012
[19]	形式隐喻	混合(属性、拓扑、距离)	地图	关系数据	社交媒体	2020
[20]	形式隐喻	混合(属性、拓扑、距离)	地图	关系数据	社交媒体	2017
[23]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	城市	关系数据	电子信息	2007
[24]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	城市/时间线	关系数据	电子信息	2008
[26]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	城市	关系数据	电子信息	2007
[64]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	沉淀过程	关系数据	生物医疗	2016
[74]	形式隐喻	混合(属性、拓扑、距离)	星空	关系数据	数字人文	2022
[78]	形式隐喻	混合(属性、拓扑、距离)	地铁图	关系数据	数据分析	2021
[80]	形式隐喻	混合(属性、拓扑、距离)	地铁图	关系数据	市场分析	2016
[83]	形式隐喻	属性	跷跷板	关系数据	数字人文	2011
[33]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	轮子	关系数据	市场分析	2016
[16]	形式隐喻	混合(属性、拓扑、距离)	向日葵	关系数据/多媒体数据	社交媒体	2012
[25]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	城市	关系数据/多维数据	电子信息	2008
[79]	形式隐喻	混合(属性、拓扑、距离)	地铁图	关系数据/多维数据	数据分析	2005
[21]	形式隐喻	混合(属性、拓扑、距离)	地图	关系数据/时空数据	社交媒体	2016
[36]	形式隐喻	混合(拓扑、距离)	时钟	关系数据/时空数据	数据分析	2013
[3]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	泡泡	时空数据	数据分析	2015
[37]	交互隐喻	混合(属性、拓扑)	时钟	时空数据	数据分析	2018
[39]	形式隐喻	属性	时钟	时空数据	电子信息	2012
[40]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	时钟、日历	时空数据	电子信息	2018
[47]	交互隐喻	交互设计	虚拟桌面	时空数据	人机交互	2019
[49]	交互隐喻	交互设计	刷子	时空数据	人机交互	2019
[72]	形式隐喻	艺术设计	连环画	时空数据	数据分析	2010
[43]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	河流/透镜	时空数据/多媒体数据	社交媒体	2007
[38]	形式隐喻	属性	时钟	时空数据/多媒体数据	数字人文	2014
[42]	形式隐喻	混合(属性、距离)	流	时空数据/多媒体数据	数据分析	2010
[44]	形式隐喻	混合(属性、拓扑)	流	时空数据/多媒体数据	数字人文	2004
[46]	形式隐喻	混合(属性、距离)	流	时空数据/多媒体数据	数据分析	2010
[63]	形式隐喻	属性	沉积过程	时空数据/多媒体数据	社交媒体	2013
[67]	形式隐喻	属性	时钟/雷达图	时空数据/多媒体数据	社交媒体	2007

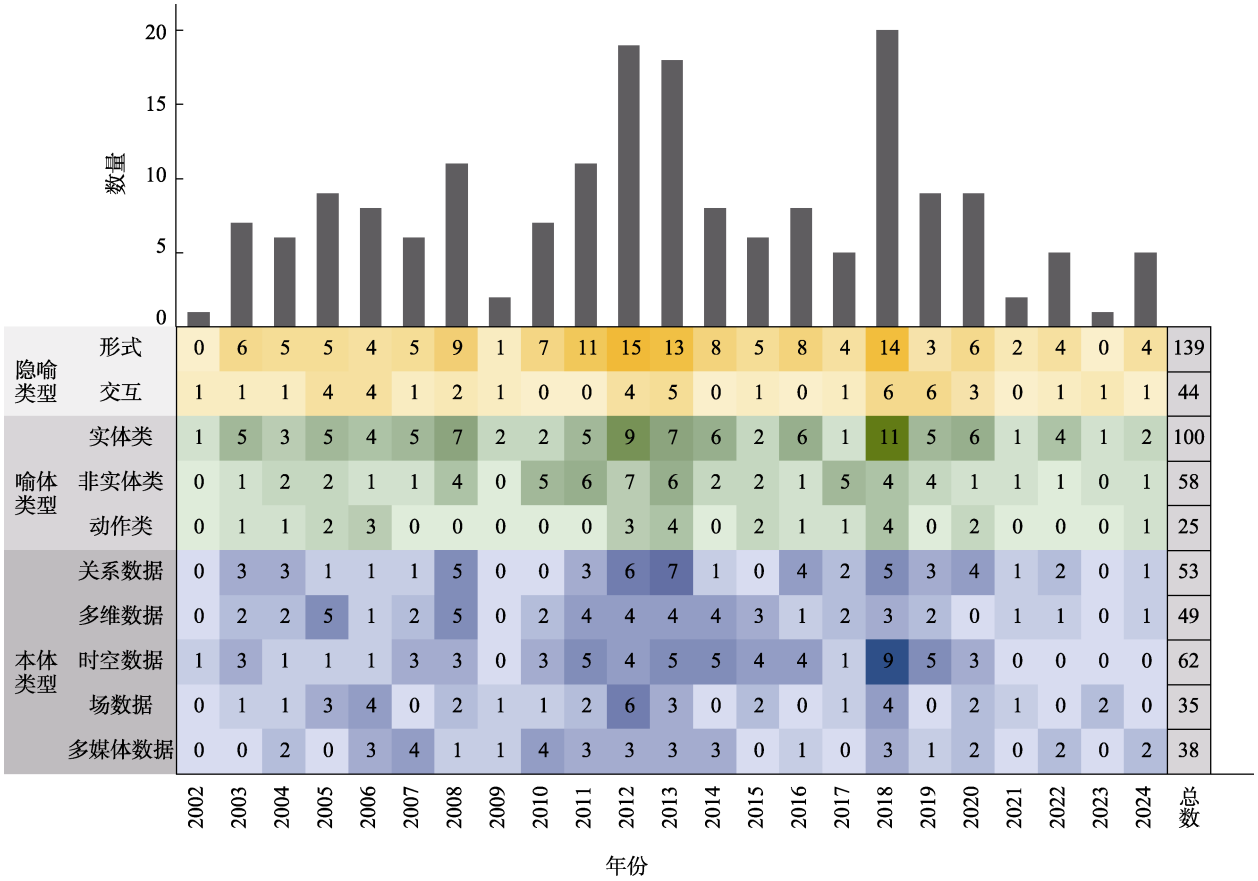


图 7　视觉隐喻工作文献总结

5　未来工作

近年来，研究者从数据驱动设计、生成式人工智能到多语言和跨文化应用等多个角度，对视觉隐喻的构建方式和流程进行了深入的探讨.

5.1　数据驱动的视觉隐喻设计

随着视觉隐喻研究工作的发展，相对定制化的视觉隐喻案例已经无法满足可视化设计的需求. 近年来，许多工作对视觉隐喻的构建方式和流程进行了深入的讨论. Data-Driven Guides 系统[84]提供了一个数据驱动的图形设计环境，能够自动地创建表示不同数值的图形元素，并支持用户自由移动、旋转或调整基本图形元素的大小；当底层数据发生变化时，该系统会自动地更新图形，确保图形与数据保持一致，支持用户创建富有表现力和准确性的自定义数据驱动图形. MetaGlyph 系统[85]则支持利用表格自动生成视觉隐喻，首先在在线资源中自动选择与输入数据语义相关的隐喻图像，然后通过蒙特卡罗树搜索算法探索图形可视化的设计，将视觉元素与数据维度相关联，并提供编辑反馈，允许用户根据个人偏好定制图形可视化设计.

通过数据驱动的方法进行视觉隐喻设计时，用户能够依据数据本身与背景设计更加生动、易于理解的视觉隐喻，提高可视化的传达效率，并增强了用户对数据的理解和记忆. Metamorpheus 系统[86]是一个新颖的交互式平台，通过视觉隐喻叙述和探索梦境中的情感体验，支持用户将自己的梦境体验转化为一系列视觉隐喻来表达梦境中的情感，通过富有创造力的图像和文本表达用户的内在感受；该系统通过生成式人工智能方法提供隐喻构建建议，并生成视觉隐喻和文本描述，用户则可以对这些生成的内容进行重新着色和重新排列，实现视觉上的情感表达.

5.2　生成式人工智能在视觉隐喻中的应用

在视觉隐喻研究中，利用大语言模型和扩散模型进行视觉隐喻的生成与理解，已经成为一个新兴的研究方向.

MetaCLUE[87]是一个全面研究视觉隐喻的框架，通过收集丰富的视觉隐喻注释，对现有的视觉和语言模型在多个任务上进行评估，包括图像分类、区域定位、理解(检索、标题生成、视觉问答)和生成(文本到图像合成)；通过实验，揭示了现有技术在字面解释上的局限性，并指出在理解和生成隐喻图像方面的不足.

Chakrabarty 等[88]提出的通过大语言模型(large language models, LLMs)和扩散模型协作，解决从语言隐喻生成视觉隐喻任务的方法，并创建一个包含 6 476 个视觉隐喻的高质量数据集，覆盖 1 540 个语言隐喻及其相关的视觉阐述；通过专业插画师的评估，证实了 LLM-扩散模型协作在生成视觉隐喻方面的潜力.

5.3 研究挑战

研究者提出了未来视觉隐喻工作的几个方向：(1) 进一步改进模型，以更好地理解和生成视觉隐喻；(2) 探索更有效的训练策略和评价指标也是提高模型性能的关键；(3) 扩大研究范围，包括多语言和跨文化的视觉隐喻，以及探索这些模型在广告、艺术和教育等领域的应用，也是未来的研究重点；(4) 解决依赖英语基础的视觉隐喻和可能的时间消耗问题等已有方法的局限性，实现更广泛的应用.

随着视觉隐喻研究的不断深入，本文预见，相关研究将朝着更个性化、智能化和跨文化的方向发展. 期待这些进展能够推动视觉隐喻不同领域的广泛应用，帮助人们实现更深层次的数据理解与情感表达.

6 结 语

本文对可视化视觉隐喻方法的研究进展进行综述，从数据类型及隐喻形式、视觉隐喻的构建方式，以及应用场景等多个角度对现有工作进行了系统的分类和总结. 未来，视觉隐喻的研究仍然充满挑战和机遇. 在视觉隐喻的构建中，如何完美地结合可视化工作与艺术设计仍是一项难点，需要研究人员与艺术创作者共同努力. 利用大型语言模型和扩散模型进行视觉隐喻的生成与理解，是一个新兴且有前景的研究方向，其中，改进模型的生成与理解能力，以及探索这些模型在广告、艺术和教育等领域的应用，都是重要的研究方向. 期待视觉隐喻能够在更多的领域中发挥作用，帮助人们更好地理解和分析日益增长的复杂数据.

参考文献(References):

[1] Eppler M J. A comparison between concept maps, mind maps, conceptual diagrams, and visual metaphors as complementary tools for knowledge construction and sharing[J]. Information Visualization, 2006, 5(3): 202-210

[2] Bendix F, Kosara R, Hauser H. Parallel sets: visual analysis of categorical data[C] //Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2005: 133-140

[3] Cruz P. Wrongfully right: applications of semantic figurative metaphors in information visualization[C] //Proceedings of the IEEE VIS Arts Program. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2015: 14-21

[4] Gali G, Oliver S, Chevalier F, *et al*. Visualizing sentiments in business-customer relations with metaphors[C] //Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Extended Abstracts. New York: ACM Press, 2012: 1493-1498

[5] Caserta P, Zendra O. Visualization of the static aspects of software: a survey[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 17(7): 913-933

[6] Roberts J C, Yang J, Kohlbacher O, *et al*. Novel visual metaphors for multivariate networks[C] //Proceedings of the Multivariate Network Visualization. Heidelberger: Springer, 2014: 127-150

[7] Preim B, Meuschke M, Weiß V. A survey of medical visualization through the lens of metaphors[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2024, 30(10): 6639-6664

[8] Pokojná H, Isenberg T, Bruckner S, *et al*. The language of infographics: toward understanding conceptual metaphor use in scientific storytelling[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2025, 31(1): 371-381

[9] Liu Tingting, Wang Yunhai, Tu Changhe, *et al*. Treemap layout based on Monte Carlo tree search[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2021, 33(9): 1367-1376(in Chinese)
(刘婷婷, 汪云海, 屠长河, 等. 基于蒙特卡罗树搜索的树图布局[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33(9): 1367-1376)

[10] Yang Zhenkai, Hua Yixin, Zhang Zheng, *et al*. Central-layout sunburst algorithm for hierarchical data visualization[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2023, 35(10): 1588-1595(in Chinese)
(杨振凯, 华一新, 张政, 等. 中心型布局的旭日图生成算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2023, 35(10): 1588-1595)

[11] Block F, Horn M S, Phillips B C, *et al*. The DeepTree exhibit: visualizing the tree of life to facilitate informal learning[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(12): 2789-2798

[12] van de Wetering H, Klaassen N, Burch M. Space-reclaiming icicle plots[C] //Proceedings of the IEEE Pacific Visualization Symposium. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2020: 121-130

[13] Fung T L, Chou J K, Ma K L. A design study of personal bibliographic data visualization[C] //Proceedings of the IEEE Pacific Visualization Symposium. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2016: 244-248

[14] Dasu K, Fujiwara T, Ma K L. An organic visual metaphor for public understanding of conditional co-occurrences[C] //Proceedings of the IEEE Scientific Visualization Conference. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2018: 1-5

[15] Shin M, Soen A, Readshaw B T, *et al*. Influence flowers of academic entities[C] //Proceedings of the IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2019: 1-10

[16] Cao N, Lin Y R, Sun X H, *et al*. Whisper: tracing the spatio-temporal process of information diffusion in real time[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(12): 2649-2658

[17] Cortese P F, Di Battista G, Moneta A, *et al*. Topographic visualization of prefix propagation in the Internet[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(5): 725-732

[18] Hu Y F, Kobourov S G, Veeramoni S. Embedding, clustering and coloring for dynamic maps[C] //Proceedings of the IEEE Pacific Visualization Symposium. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2012: 33-40

[19] Chen S, Li S H, Chen S M, *et al*. R-Map: a map metaphor for visualizing information reposting process in social media[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2020, 26(1): 1204-1214

[20] Chen S M, Chen S, Lin L J, *et al*. E-Map: a visual analytics approach for exploring significant event evolutions in social media[C] //Proceedings of the IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2017: 36-47

[21] Chen S M, Chen S, Wang Z H, *et al*. D-Map: visual analysis of ego-centric information diffusion patterns in social media[C] //Proceedings of the IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2016: 41-50

[22] Dou W W, Wang X Y, Skau D, *et al*. LeadLine: interactive visual analysis of text data through event identification and exploration[C] //Proceedings of the IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2012: 93-102

[23] Panas T, Epperly T, Quinlan D *et al*. Communicating software architecture using a unified single-view visualization[C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Engineering Complex Computer Systems. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2007: 217-228

[24] Wettel R, Lanza M. Visual exploration of large-scale system evolution[C] //Proceedings of the 15th Working Conference on Reverse Engineering. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2008: 219-228

[25] Wettel R, Lanza M. Visually localizing design problems with disharmony maps[C] //Proceedings of the 4th ACM Symposium on Software Visualization. New York: ACM Press, 2008: 155-164

[26] Alam S, Dugerdil P. EvoSpaces visualization tool: exploring software architecture in 3D[C] //Proceedings of the 14th Working Conference on Reverse Engineering. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2007: 269-270

[27] Panas T, Berrigan R, Grundy J. A 3D metaphor for software production visualization[C] //Proceedings of the 7th International Conference on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2003: 314-319

[28] Wang Y, Zhang H D, Huang H, *et al*. InfoNice: easy creation of information graphics[C] //Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2018: Article No.335

[29] Weber G, Bremer P T, Pascucci V. Topological landscapes: a terrain metaphor for scientific data[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(6): 1416-1423

[30] Oesterling P, Scheuermann G, Teresniak S, *et al*. Two-stage framework for a topology-based projection and visualization of classified document collections[C] //Proceedings of the IEEE Symposium on Visual Analytics Science and Technology. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2010: 91-98

[31] Kunkel J, Loepp B, Ziegler J. A 3D item space visualization for presenting and manipulating user preferences in collaborative filtering[C] //Proceedings of the 22nd International Conference on Intelligent User Interfaces. New York: ACM Press, 2017: 3-15

[32] Alsallakh B, Aigner W, Miksch S, *et al*. Reinventing the contingency wheel: scalable visual analytics of large categorical data[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(12): 2849-2858

[33] Liu X T, Xu A B, Gou L, *et al*. SocialBrands: visual analysis of public perceptions of brands on social media[C] //Proceedings of the IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2016: 71-80

[34] Dong Y, Fauth A, Huang M L, *et al*. PansyTree: merging multiple hierarchies[C] //Proceedings of the IEEE Pacific Visualization Symposium. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2020: 131-135

[35] Chau M. Visualizing web search results using glyphs: design and evaluation of a flower metaphor[J]. ACM Transactions on Management Information Systems, 2011, 2(1): Article No.2

[36] Borkin M A, Yeh C S, Boyd M, *et al*. Evaluation of filesystem provenance visualization tools[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2013, 19(12): 2476-2485

[37] Schwarzinger F, Roschal A, Gschwandtner T. Sketching temporal uncertainty: an exploratory user study[C] //Proceedings of the Eurographics/IEEE VGTC Conference on Visualization: Short Papers. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2018: 67-71

[38] Abdul-Rahman A, Maguire E, Chen M. Comparing three designs of macro-glyphs for poetry visualization[C] //Proceedings of the Eurographics Conference on Visualization. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2014: 103-107

[39] Fischer F, Fuchs J, Mansmann F. ClockMap: enhancing circular treemaps with temporal glyphs for time-series data[C] //Proceedings of the Eurographics Conference on Visualization. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2012: 97-101

[40] Yoo S, Jo J, Kim B, *et al*. LongLine: visual analytics system for large-scale audit logs[J]. Visual Informatics, 2018, 2(1): 82-97

[41] Weng D, Zhu H M, Bao J, *et al*. HomeFinder revisited: finding ideal homes with reachability-centric multi-criteria decision making[C] //Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2018: Article No.247

[42] Wei F R, Liu S X, Song Y Q, *et al*. TIARA: a visual exploratory text analytic system[C] //Proceedings of the 16th ACM

SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM Press, 2010: 153-162

[43] Ghoniem M, Luo DN, Yang J, *et al*. NewsLab: exploratory broadcast news video analysis[C] //Proceedings of the IEEE Symposium on Visual Analytics Science and Technology. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2007: 123-130

[44] Viégas F B, Wattenberg M, Dave K. Studying cooperation and conflict between authors with history flow visualizations[C] //Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2004: 575-582

[45] Heimerl F, Han Q, Koch S, *et al*. CiteRivers: visual analytics of citation patterns[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2016, 22(1): 190-199

[46] Shi L, Wei F R, Liu S X, *et al*. Understanding text corpora with multiple facets[C] //Proceedings of the IEEE Symposium on Visual Analytics Science and Technology. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2010: 99-106

[47] Wagner Filho J A, Freitas C M D S, Nedel L. Comfortable immersive analytics with the VirtualDesk metaphor[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2019, 39(3): 41-53

[48] Cirio G, Marchal M, Regia-Corte T, *et al*. The magic barrier tape: a novel metaphor for infinite navigation in virtual worlds with a restricted walking workspace[C] //Proceedings of the 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. New York: ACM Press, 2009: 155-162

[49] Hurter C, Henry Riche N, Drucker S M, *et al*. FiberClay: sculpting three dimensional trajectories to reveal structural insights[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2019, 25(1): 704-714

[50] Matejka J, Glueck M, Bradner E, *et al*. Dream lens: exploration and visualization of large-scale generative design datasets[C] //Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2018: Article No.369

[51] Tzeng F Y, Lum E B, Ma K L. An intelligent system approach to higher-dimensional classification of volume data[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, 11(3): 273-284

[52] Wang L, Zhao Y, Mueller K, *et al*. The magic volume lens: an interactive focus+context technique for volume rendering[C] //Proceedings of the IEEE Visualization Conference. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2005: 367-374

[53] Kruger J, Schneider J, Westermann R. ClearView: an interactive context preserving hotspot visualization technique[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(5): 941-948

[54] McGuffin M J, Tancau L, Balakrishnan R. Using deformations for browsing volumetric data[C] //Proceedings of the IEEE Visualization Conference. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2003: 401-408

[55] Correa C, Silver D, Chen M. Feature aligned volume manipulation for illustration and visualization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(5): 1069-1076

[56] Cuntz N, Kolb A, Strzodka R, *et al*. Particle level set advection for the interactive visualization of unsteady 3D flow[J]. Computer Graphics Forum, 2008, 27(3): 719-726

[57] Zhang J, Tao J, Wang J X, *et al*. SurfRiver: flattening stream surfaces for comparative visualization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2021, 27(6): 2783-2795

[58] Hochstetter H, Wurm M, Kolb A. Vector field visualization of advective-diffusive flows[J]. Computer Graphics Forum, 2015, 34(3): 481-490

[59] Tong X, Chen C M, Shen H W, *et al*. Interactive streamline exploration and manipulation using deformation[C] //Proceedings of the IEEE Pacific Visualization Symposium. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2015: 1-8

[60] von Funck W, Weinkauf T, Theisel H, *et al*. Smoke surfaces: an interactive flow visualization technique inspired by real-world flow experiments[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(6): 1396-1403

[61] Viégas F B, Wattenberg M, Feinberg J. Participatory visualization with wordle[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(6): 1137-1144

[62] Bao Chen, Wang Yunhai. A survey of word cloud visualization[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2021, 33(4): 532-544(in Chinese)
(包琛, 汪云海. 词云可视化综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33(4): 532-544)

[63] Huron S, Vuillemot R, Fekete J D. Visual sedimentation[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2013, 19(12): 2446-2455

[64] El-Assady M, Gold V, Acevedo C, *et al*. ConToVi: multi-party conversation exploration using topic-space views[J]. Computer Graphics Forum, 2016, 35(3): 431-440

[65] Fei Yanlin, Gao Tian, Li Yanda, *et al*. BioVistory: an end-to-end visualization generation approach to supporting storytelling with biographical text data[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2025, 37(8): 1426-1438(in Chinese)
(费彦琳, 高天, 李俨达, 等. 基于人物传记文本数据的叙事可视化自动生成系统[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2025, 37(8): 1426-1438)

[66] Viégas F B, Perry E, Howe E, *et al*. Artifacts of the presence era: using information visualization to create an evocative souvenir[C] //Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2004: 105-111

[67] Bergstrom T, Karahalios K. Conversation clock: visualizing audio patterns in co-located groups[C] //Proceedings of the 40th Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2007: Article No.78

[68] Legg P A, Chung D H S, Parry M L, *et al*. MatchPad: interactive glyph-based visualization for real-time sports performance analysis[J]. Computer Graphics Forum, 2012, 31(3pt4): 1255-1264

[69] Sun Z, Sun M, Cao N, *et al*. VideoForest: interactive visual summarization of video streams based on danmu data[C] //Proceedings of the SIGGRAPH Asia Symposium on Visualization. New York: ACM Press, 2016: 1-8

[70] Piringer H, Buchetics M, Benedik R, *et al*. AlVis: situation awareness in the surveillance of road tunnels[C] //Proceedings of the IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press,

2012: 153-162

[71] Wu Y C, Wei F R, Liu S X, *et al*. OpinionSeer: interactive visualization of hotel customer feedback[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2010, 16(6): 1109-1118

[72] Jin J, Szekely P. Interactive querying of temporal data using a comic strip metaphor[C] //Proceedings of the IEEE Symposium on Visual Analytics Science and Technology. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2010: 163-170

[73] Yan Y K, Yu C, Ma X J, *et al*. VirtualGrasp: leveraging experience of interacting with physical objects to facilitate digital object retrieval[C] //Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2018: 1-13

[74] Tkachev G, Cutura R, Sedlmair M, *et al*. Metaphorical visualization: mapping data to familiar concepts[C] //Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2022: Article No.10

[75] Andrews C, North C. The impact of physical navigation on spatial organization for sensemaking[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2013, 19(12): 2207-2216

[76] Consolvo S, McDonald D W, Toscos T, *et al*. Activity sensing in the wild: a field trial of ubifit garden[C] //Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2008: 1797-1806

[77] Yi S J, Melton R, Stasko J, *et al*. Dust & magnet: multivariate information visualization using a magnet metaphor[J]. Information Visualization, 2005, 4(4): 239-256

[78] Jacobsen B, Wallinger M, Kobourov S, *et al*. MetroSets: visualizing sets as metro maps[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2021, 27(2): 1257-1267

[79] Stott J M, Rodgers P, Burkhard R A, *et al*. Automatic layout of project plans using a metro map metaphor[C] //Proceedings of the 9th International Conference on Information Visualisation. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2005: 203-206

[80] Zhao J, Glueck M, Chevalier F, *et al*. Egocentric analysis of dynamic networks with EgoLines[C] //Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2016: 5003-5014

[81] Semeraro A, Turmo Vidal L. Visualizing instructions for physical training: exploring visual cues to support movement learning from instructional videos[C] //Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2022: 1-16

[82] Heinrich F, Joeres F, Lawonn K, *et al*. Comparison of projective augmented reality concepts to support medical needle insertion[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2019, 25(6): 2157-2167

[83] Brandes U, Nick B. Asymmetric relations in longitudinal social networks[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 17(12): 2283-2290

[84] Kim N W, Schweickart E, Liu Z C, *et al*. Data-driven guides: supporting expressive design for information graphics[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2017, 23(1): 491-500

[85] Ying L, Shu X H, Deng D Z, *et al*. MetaGlyph: automatic generation of metaphoric glyph-based visualization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2023, 29(1): 331-341

[86] Wan Q, Feng X, Bei Y N, *et al*. Metamorpheus: interactive, affective, and creative dream narration through metaphorical visual storytelling[C] //Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2024: Article No.166

[87] Akula A R, Driscoll B, Narayana P, *et al*. MetaCLUE: towards comprehensive visual metaphors research[C] //Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2023: 23201-23211

[88] Chakrabarty T, Saakyan A, Winn O, *et al*. I spy a metaphor: large language models and diffusion models co-create visual metaphors[C] //Proceedings of the Association for Computational Linguistics. Stroudsburg: Association for Computational Linguistics, 2023: 7370-7388