

【专题：数据可视化与数字创意设计】

数据可视化中的设计美学研究综述

贾倩文¹, 柴春雷², 蔡蕊屹²

(1.天津天狮学院, 天津 301738; 2.浙江大学, 杭州 310027)

摘要: **目的** 对国内外数据可视化中设计美学研究的梳理, 形成较为全面、清晰的知识框架并为未来相关理论与技术应用的研究发展提供参考。**方法** 基于 CNKI 与 WoS 数据库选取 1984—2022 年的文献, 利用可视化文献分析软件对关键词与热点进行共现分析, 以数据可视化定义与分类为起点, 对数据可视化的交互技术与美学评价等方面, 按时间顺序对相关学者的代表性观点进行归纳并分析其相互关系。**结论** 梳理了可视化表现形式的发展过程及其交互方式与技术; 总结了数据可视化中的美学要素; 分析了数据可视化中设计美学与传统美学的异同; 预测了数据可视化中设计美学研究方向与发展趋势; 指出数据可视化中设计美学研究应以数据的高效获取为目标、以数字化技术与美学设计为手段、以体验升级为重点, 将客观数据与用户主观判断有机融合, 为用户创造更好更高效的数据获取体验。

关键词: 数据可视化; 设计美学; 交互技术; 美学要素

中图分类号: TB482 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)20-0013-13

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.20.002

Design Aesthetics Studies in Data Visualization

JIA Qian-wen¹, CHAI Chun-lei², CAI Rui-yi²

(1.Tianjin Tianshi University, Tianjin 301738, China; 2.Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

ABSTRACT: The paper intends to sort out the domestic and international research on design aesthetics, form a comprehensive and clear framework, and provide a reference for future research and application of related theories and technologies. Based on the 1984-2022 literature selection from CNKI and WoS database, the keywords and hotspots are jointly analyzed by using the relevant visual literature analysis software. The definition and classification of data visualization are used as a starting point to summarize and analyze the representative views of scholars on interaction technology and aesthetic evaluation of data visualization in chronological order. The paper sorted out the development process of visualization expressions, proposed the interaction methods and technologies of data visualization and summarized the aesthetic elements in the data visualization; the similarities and differences between design aesthetics in data visualization and traditional aesthetics were analyzed, and the research direction and development trend of design aesthetics in data visualization are predicted. The paper pointed out that the research of design aesthetics in data visualization should take the efficient acquisition of data as the goal, take digital technology and aesthetic design as the means, focus on experience upgrading, and organically integrate objective data with user subjective judgment, so as to create a better and more efficient data acquisition experience for users.

KEY WORDS: data visualization; design aesthetics; Interactive technology; aesthetic elements

在信息爆炸的时代下, 数据可视化为人们快速获取知识与洞察规律提供了快捷方式, 好的数据表现形式能够化繁为简, 帮助人们快速达到“视物致知”的

目的; 错误的表示会对数据传播造成一定的损害, 给使用者的判断造成部分或全部的误导。随着科技的不断发展, 用户对数据可视化的需求也随之升级, 一个

收稿日期: 2022-05-11

基金项目: 天津市艺术科学规划一般项目 (D22005)

作者简介: 贾倩文 (1993—), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为数字服务设计、产品设计。

有效的可视化设计不仅包括数据的挖掘与筛选、交互逻辑与技术选择,还包括可视化形式中的视图选择与设计美学等相关研究。

本文围绕数据可视化中设计美学研究进行综述,首先从“数据分类-可视化形式-交互方式与技术”三个方面介绍了数据可视化的研究现状;其次从“设计美学-需求分析-美学要素-应用原则”四个方面对数据可视化中的设计美学相关研究与问题进行阐述;再次从传统美学评价与数据可视化中美学评价的异同对现有方法进行梳理;最后对数据可视化中设计美学研究发展进行思考和展望。

1 数据可视化

狭义上的数据可视化是指运用计算机图形学和图像处理技术,借助人脑的视觉思维能力,将抽象的数据表现为可见的图形或图像,帮助人们发现数据中隐藏的内在规律,并进行交互处理的理论、方法和技术;广义上的数据可视化则是数据可视化、信息可视化和科学可视化等多个领域的统称,其中“可视化”除了可被理解为“看见”之外,还可以被理解为“易于理解”。随着科学技术的不断进步,数据的定义从常规认知观念中数字、符号也逐步延伸到动作、表情、心率等可被监测的生理或者肢体行为^[1]。作为交叉学科的数据可视化根据其数据呈现过程,可将其研究对象分为数据、表现形式、可视化技术三个方面。因此,本文就此三个方面按照时间顺序进行综述^[2]。

1.1 数据的分类

基于狭义的数据概念,可将数据根据其自身变化分为自变量、因变量、干涉变量、控制变量等数据类型;基于广义的数据概念,可将数据从使用目的分为存储数据与统计数据。其中存储数据又可分为物化存储数据与数字化数据,具有存储功能的物化数据泛指地图、表格、影像、磁带、纸带等;数字化数据又可分为矢量数据、格网数据等;统计数据又可分为4种类型:一是定类数据,多从类别而非顺序上进行区分,多是由定类尺度计量形成的;二是定序数据——表现为类别,但有顺序,是由定序尺度计量形成的;三是定距数据——表现为数值,可进行加、减运算,是由定距尺度计量形成的;四是定比数据——表现为数值,可进行加、减、乘、除运算,是由定比尺度计量形成的。此外,国内外部分学者按照自身需求与理解从整体上将数据分为两大类,一是按照数据特征与任务关系进行分类,二是按照不同应用领域中的使用目标进行分类。

从数据特征及其任务关系出发,Stevens^[3]基于数据分析目的将数据分为类别型数据、有序型数据、区间型数据和比值型数据;Shneiderman^[4]按照任务分类

法在实验中将数据分为7类,分别是一维数据、二维数据、三维数据、时间数据、多维数据、树状数据、网络数据;田雷等^[5]将数据可视化之间的关系分为5类,分别是单个数据的可视化、流关系数据的可视化、对比关系数据的可视化、层次关系数据的可视化和逻辑关系数据的可视化;陈为等^[6]从宏观上将数据分为时空数据和非时空数据,从关系模型的角度和数据属性的角度对数据进行分类,从关系模型将数据分为实体和关系两部分,从数据属性分为离散和连续;孙东伟等^[7]将数据按性质与表现形式分别进行分类,首先从数据性质将其分定位数据、定性数据、定量数据与定时数据,接着她从表现形式上又将数据分别分为数字数据与模拟数据。

从数据的应用领域出发,数据分类依据与结果通常因学者研究背景差异而不同,如郑娅峰等^[8]从教育领域的可视化角度将数据分为文本数据、多维数据、网络数据、时间序列数据与地理空间数据;刘书含等^[9]从工业应用领域中数据可视化角度出发,按照工业生产顺序划分为设计规划、生产制造和产品运维等3个阶段对数据进行分类;王艺等^[10]将医疗领域的数字数据主要分为临床实验数据、生物医药数据、电子病历与诊断书数据、个体健康信息;JO^[11]从AR应用领域出发,从整体上将数据分为现实数据与增强数据,数据分类总览见表1。

1.2 数据可视化表现形式的发展

数据可视化美学设计的起源可追溯至著名天文学家Halley于1702年徒手绘制的地图,这一时期较有代表性的还有William Playfair在1765年创造的第一张时间线图。现代可视化设计的开端可追溯到1801年英国地质学家William Smith的一张“改变世界的地图”,他在地图上用不同的曲线表现出不同的数量信息,这一举动突破了传统地质图可视化的表现方式,并在地图绘制领域掀起了一股潮流,随后法国工程师Charles Joseph Minard用二维的表现手法展示了6张拿破仑战争时期军队损失的统计图,标志着19世纪上半叶数据制图的黄金时期的到来。1855年南丁格尔绘制了一张英国军队士兵死亡原因图,图中用简单的表现形式深刻地解释了死亡背后的原因,充满了情感化,见图1。1879年Luigi Perozzo开创性地以三维立体有彩金字塔的表现形式绘制了一张瑞典人口普查数据图,这种表现形式不仅提高了受众对信息获取的感知力与速度,还突破了当时已有的表现形式。

纵观18世纪多种数据可视化表现形式与方法的涌现,意味着人们开始意识到数据可视化的美观性对数据获取有效性之间的影响,随着人们意识的觉醒,诸学者也逐步开始对数据可视化更高维度的表现形式、方法和其在不同领域的匹配相适度进行尝试与探索^[12]。

表 1 数据分类
Tab.1 Data classification

分类依据	内容	代表人物
目标任务	实验过程	一维数据、二维数据、三维数据、时间数据、多维数据、树状数据、网络数据
定义	实验过程	Ben Shneiderman (2003)
定义	广义	存储数据、统计数据
定义	狭义	自变量、因变量、干涉变量、控制变量等数据类型
应用领域	教育	Julie SteeleNoah (2011)
应用领域	工业数据	文本数据、多维数据、网络数据、时间序列数据与地理空间数据
应用领域	VAR 领域	郑娅峰（2009）
数据特征	数据关系	刘书含（2021）
数据特征	数据属性	现实数据、增强数据
数据特征	时空维度	Gerard Jounghyun Kim (2017)
与关系	数据性质	类别型数据、有序型数据、区间型数据和比值型数据
与关系	表现形式	Stevens（1946）
与关系	数据性质	单个数据、流关系数据、对比关系数据、层次关系数据、逻辑关系数据
与关系	表现形式	田雷（2018）
与关系	数据性质	离散、连续
与关系	数据性质	时空数据：空间标量数据、多变量空间数据可视化、时变数据
与关系	数据性质	非时空数据：层次和网络数据、文本文档数据、跨媒体数据、复杂高维度数据
与关系	数据性质	定位数据、定性数据、定量数据、定时数据
与关系	数据性质	数字数据、模拟数据
与关系	数据性质	孙东伟（2020）

等

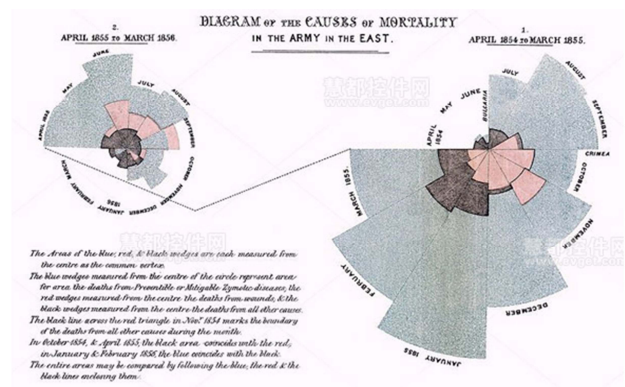


图 1 南丁格尔玫瑰图
Fig.1 The Nightingale Rose chart

20 世纪，随着各种数据生成与绘制软件的普及，各研究单位逐渐开始使用数字化表现手段取代手绘图形，各种新型的数据可视化表现形式与方法开始出现，见图 2。20 世纪 80 年代至今，多维空间中动态交互式的数据可视化方式成为新的发展主题^[13]，部分学者如芮小丹等^[14]将可视化形式分别从静态、动态进行梳理，其中静态图形包含极区图、桑基图、矩形式图、热力图、树状图、Hypobarictree 图、气泡图、地图、Andrews 曲线法、投影法、星绘法（Star plots）、体模型法、星状坐标系统的多维信息显示方法和 Chernoff 面法、弹性网络图等形式；动态可视化形式包括以动画形式为主的动态图表，相关工具主要有

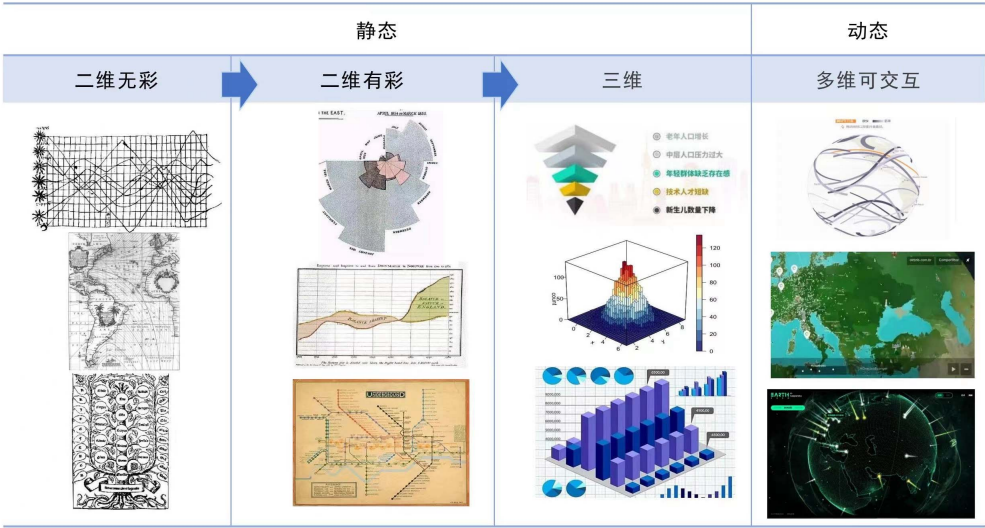


图 2 数据可视化形式发展
Fig.2 List of data visualization form development

Processing、Ocam、Adobe premiere、Adobe effect 等；陈为等^[6]根据时空维度将数据细分为数十种形式并对可视化形式与方法展开说明。

1.3 数据可视化的交互方式与技术

交互方式与技术是相互促进、相互影响的关系，技术的发展能为用户创造体验更好的交互方式，对用户交互方式背后需求的深入挖掘又能对交互技术的发展起到激励作用，最终交互方式与技术的变革又会对交互模式产生影响。基于相关文献分析，本文从交互任务、交互空间、交互通道对可视化交互方式与技术进行梳理。

从交互任务出发，陈为等^[6]在 Amar 提出的七大可视化任务基础上，将可视化系统中的交互技术补充为选择、导航（缩放、平移、旋转）、重配、编码、抽象-具体、过滤、关联、概览+细节、焦点+上下文（变形、加层）；刘滨等^[15]依据数据特征将现有的数据可视化技术主要分为基于几何技术、基于图标技术、基于降维技术、面向像素技术、基于时间序列技术、基于网络数据技术的数据可视化方法，以及层次可视化技术和分布技术等；Jaemin 等^[16]基于 Spark 的

流式处理方式，利用亚马逊 EC2 集群开发了适用于大规模高维数据可视分析系统“SwiftTuna”；Nostalgia^[17]从情感可视化的角度研发出 VisAP 智能模型，模型会根据用户自主输入的故事中不同情节与角色进行情感权重分析，最后通过可视化界面进行展示。

交互空间宏观上主要分为传统物理空间和数字信息空间，具体又可细分为屏幕空间、数据值空间、数据结构空间、属性空间、对象空间和可规划结构空间，现有的交互通道主要是以视、听、触 3 种感官通道的多重交互为主，不同的交互通道与空间对交互技术的要求也各不相同。随着虚拟现实技术的普及，数字空间中的混合可视化技术进入诸学者视野，如 Moller 等^[18]对虚拟数字可视化形式进行了创新，算法设计者可以对可视化形式的显示属性如空间化、时间、颜色、和透明度等要素进行自主选择，生成具有个人风格的可视化界面；Cheng Li 等^[19]提出 Virtual Retractor 技术，这项技术可以在不影响数据特征的前提下，允许用户模拟像切割和分割实际物体一样直接操纵和探索数据，多角度的切割与转换可以使用户更轻易、直观地感受到数据的变化，见图 3；Gerard

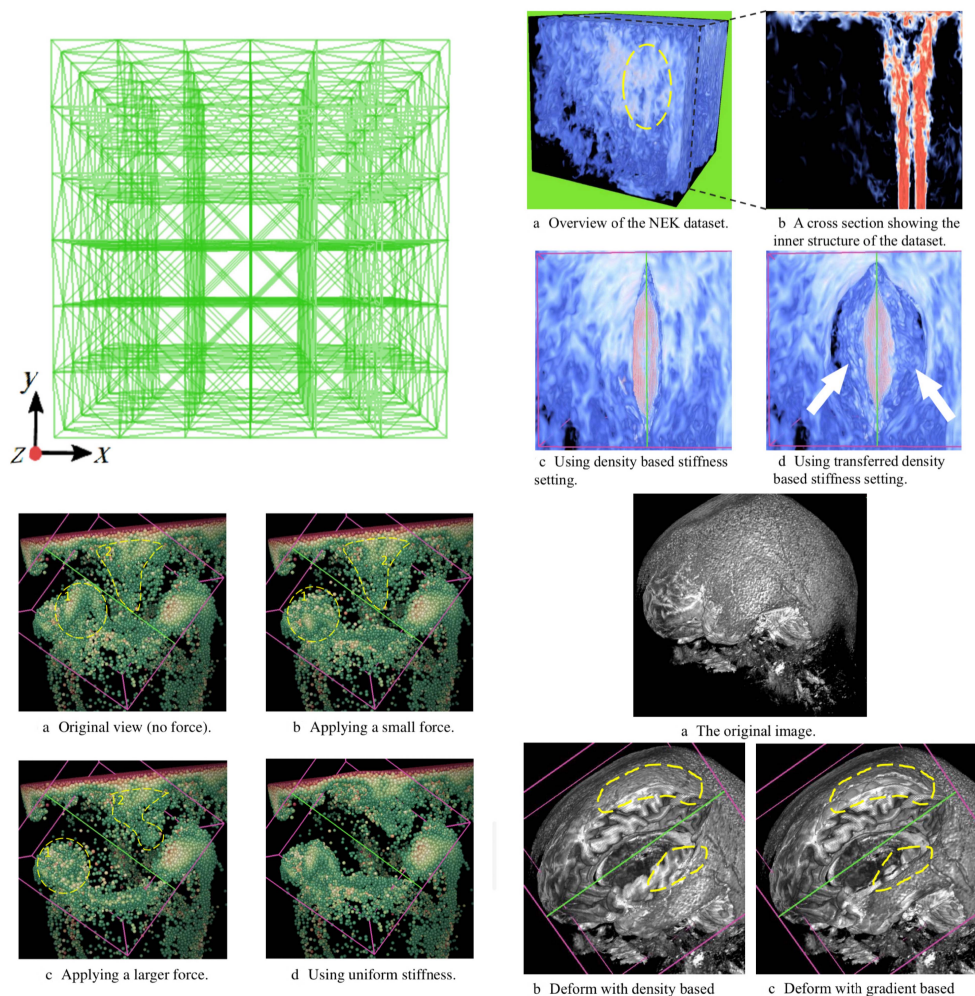


图 3 Virtual Retractor 技术
Fig.3 Virtual Retractor Technology

2.2 设计美学的概念界定

数据可视化中的设计美学研究可以从设计美学的起源发展进行回顾,美学最初的意义是“对感观的感受”,由德国哲学家 Baumgarten 在他的《美学》中首次提出,此书是历史上的第一部美学专著。在 Baumgarten 之后,Immanuel Kant 与 Hegel 也就美学进行了相关的讨论并著有《美学》等相关书籍,整体来看西方初期关于美学的讨论主要以思辨的形式分,别从美学研究的主客观性、美学的精神性、物质性等方面进行了讨论。

国际上设计美学的研究可追溯到 20 世纪 30 年代技术美学的诞生,其主要包含两个方面内容,一方面是生产中的美学问题,也就是生产美学、劳动美学等问题;另一方面是研究劳动生产中与美学问题密切相关的艺术设计,即“迪扎因”(design)问题,这种设计不仅涉及现代科学技术的最新成果,而且还涉及整个社会生活的美化。从 19 世纪中下叶开始,相关研究人员进一步对美学领域从宏观研究与微观研究、综合研究与分门研究、理论探讨与实际应用展开了深入研究^[22]。

回顾我国以设计美学命名的著作可追溯到 1989 年翟光前编著的《设计美学》,以此书为始,据不完全统计,我国关于设计美学的专著现有 30 部左右,相关学者对美的理解与研究视角也各不相同。朱光潜、叶郎等对美的形态中的“态”通常更多地从儒释道中所谓的“意境”“气韵”“道法”等方面进行更深入的阐述;章利国、陈望衡、徐恒醇^[23]3 位则围绕设计过程的美学、设计美学与美学的关系等视角展开讨论;黄柏青^[24]、梁梅分别从设计美学的现象、要素与表现、不同时期的设计美学侧重点等方面进行讨论。

此外,我国在对设计美学的对象、本质、范围的相关定义也各不相同,如张黔^[25]认为“设计艺术之美的本质是在解决人的实用功能的前提下能体现人对自由的追求的人为性形式,美源自于劳动”;徐恒醇提出“设计美学是探讨设计艺术实践的美学意义及人类如何通过按照美的规律进行创造性的设计活动”;梁梅^[26]提出设计美学是一个时期、一个民族审美观念的物化。在多样化且无法统一的定义背后,究其原因,一方面是由于研究者个人审美体验的相对主观性所导致的评价差异化,另一方面是由于不同时代背景下我国设计学科的定义、研究范畴与地位一直处于动态变化之中^[27]。

2.3 数据可视化中需求驱动的设计美学研究发展

基于对数据可视化与设计美学相关概念的梳理,数据可视化中的设计美学研究可以定义为,以设计为桥梁实现数据可视化中的审美体验研究,在保证用户高效地获得所需内容的同时能够唤起用户情绪反应。数据可视化中美学需求的发展与计算机学科技术的

发展息息相关,在早期计算机学科领域的研究重点多以解决功能性需求为主,对数据可视化中关于“美”的作用与研究较少^[28]。

20 世纪之前,数据可视化技术正处于启蒙期,此间多是围绕网页相关的基础运行与美化进行研究,数据可视化中设计美学系统研究相对较少。如 John Boyle 等^[29]于 1993 年对数据可视化的数据库问题和用户界面交互和演示进行研究;Schenkma 等^[30]对网页的美学偏好进行研究并提出 4 个关于网页审美的维度即插图、文本,概述和结构,梳理出网页对用户的吸引力与功用性中所包含的不同要素。

20 世纪之后,数据可视化的美学研究转为对可视化全流程中综合因素的分析。如 Robert Kosara^[28]提出信息美学与环境可视化密切相关;Tateosian 等^[31]提出提高可视化的艺术价值会产生更有效的视觉分析;Sara Diamond^[32]从数据可视化多元美学视角出发,提出一个成功的可视化能跨越多个边界并为同一数据集提供不同的视角,她围绕数据可视化中的多元美学就“可用性与美感”“沉浸美学”“基于美学的数据可视化附加值”等方面进行了综合性提问;Moere 等^[33]提出数据获取过程中数据环境的可视化美学设计对用户获取数据的效用影响同等重要;Kostelnick 等^[34]提出当代数据可视化可通过颜色、新颖性和多模态特征等方面的设置使用户产生与已有体验类似的情感诉求,值得注意的是,在传统的不研究中设计美学通常关注激发用户的正面情绪,而 Kostelnick 提出悲情诉求也是当代数据可视化不可或缺的一部分。

数据可视化中美学需求的进步表明了新技术背景下用户对数据获取便利性、精准性和数据获取过程中的体验性等方面的意识觉醒,其中用户需求与认知又会受大的时代技术背景的限制。在需求驱动与技术约束相互作用中,设计美学在数据可视化领域中发挥的作用除了帮助用户更快速、清晰、有效地识别与获取数据外,对改善用户的获取感受与保持识记等方面同样发挥了重要的作用。

2.4 数据可视化中设计美学要素

数据可视化中的设计美学要素与用户的审美体验息息相关,审美体验又受主客观因素共同制约^[35]。根据对相关文献的梳理,数据可视化中的美学要素可从主、客观层面归纳为四个方面,主观上包括用户个人与审美过程两个方面,客观上包括数据特征与交互过程两方面,本文按照主、客观顺序分别进行说明,并将数据可视化中的美学要素进行整理,见图 5。

1) 从用户个人角度出发,可细分为性别、设计才智、个性等方面。在性别上,Eckerman 与 Harrison 等^[36]提出美学刺激会因性别不同导致一定的判断差异,与女性更喜欢曲线柔和系的颜色和造型相比,男

性更倾向于选择色彩相对鲜艳的直线型造型,此外在复杂程度上男性通常不容易受到图片复杂度的影响,而女性则表现在信息图的选择上倾向于选择颜色丰富但较为简单的图片; Seifert 等^[37]在研究中提出“设计才智”一词,他认为用户的设计才智会影响他们做出不同的评价结果,具有高设计才智的消费者产品的感觉链接方面的能力与速度相对更快更强; Annemarie Quispel 等基于信息设计者角度提出清晰度和美学是决定可视化吸引力水平的主要影响因素,其中清晰度是最为重要的。

2) 从审美过程出发,可分为审美反应、审美体验与认知偏好等方面。Hekkert 提出人们对于审美需求源自“进化美学”,即人类在进化的过程中由于使用产品时自然产生需求升级而导致审美需求不断变化,包括人们所有感官得到满足度与人们赋予产品的意义,以及引发的情感体验源于进化美学引起的感官适应等; 李东进^[38]等提出审美体验的情感反应过程中,反应时间、处理流畅度、愉悦唤起、认知负荷四个方面会影响用户审美体验; 胡佳宝等^[39]提出个体差

异是大众与个人审美品位比例发生改变的重要来源,其中个体差异包括专业性、文化背景、先前经验、年龄等因素,这与 Vittotio Gallese 于 2009 年提出的美感体验不仅源于对艺术作品的纯粹视觉感知,还受情感共振与历史文化影响的观点相似。

3) 从数据特征出发,可分别从数据与数据集相关的特征进行分析。Bertin^[40]从图形符号学的角度将影响视觉熟悉感的组织层次分为平面、大小、纹理、颜色、方向、形状等要素; Wilkinson 等^[41]基于图形语法提出美学属性五个方面即形式、表面、运动、声音、文字,并对其进行细化; Kong 等^[42]提出数据集包含 8 种美学因素,分别是平衡、颜色和谐型、趣味、景深、光照、主体、颜色丰富性; 曾琼等^[43]提出数据可视化中的色彩设计能让用户高效地理解数据、发现规律、探索任务,其色相、色彩倾向、明度、饱和度等,颜色偏好又会由于文化、生命周期和其他人口统计学特征而变化,多明格斯鲁埃等^[44]提出在数据可视化美学建模中包括点线面肌理、版式编辑与界面分割、动态与静态比例、明暗等基本要素。



图 5 基于数据特征的可视化美学要素

Fig.5 Visual aesthetic elements based on data characteristics

4) 从交互过程出发,包括交互环境与模式、交互媒介、交互次序等方面。在交互模式上,Langner 等^[45]于 2018 年提出可视化交互媒介与交互环境互相影响,随后其团队在 2021 年提出“Marvis”概念框架,即通过移动设备和头戴式增强现实设备(AR)可在显示器周围显示额外的 2D 和 3D 信息并进行视觉数据分析,从而实现有限屏幕空间的扩展^[46];在交互媒介即数据可视化的物质载体上,目前主要呈现出智能化、轻薄化、符号化、多设备交互的趋势,在美学要素上大体可归纳为功能、材料、形式等方面; Kim 等^[11]提出交互次序对数据可视化美学感受会产

生一定的影响,他提出不论时间跨度的长短,如果个体的先前经验不同,序列依赖效应会影响当下的审美活动并导致不同程度的个体差异。

3 数据可视化中设计美学要素应用原则与评价方法

3.1 基于数据可视化的美学应用原则

2000 年之前,相关研究者多是将艺术学领域中的美学法则直接应用于基础的数据可视化表现中。艺术学领域下的美学原则最早可追溯到 1892 年 Boselie

等^[47]首次提出的多样性统一原则。随后在美术与艺术设计相关应用领域使用较多的便是形式美法则。此外还有部分学者从心理学角度对美学相关的法则与应用原则展开了研究,如 Hekkert^[48]于 2006 年从进化心理学的角度出发,提出设计中审美愉悦的四个原则,即最大效果的最小手段原则、统一的多样性原则、最先进的但可接受原则和最佳匹配原则。

随着技术的完善,设计美学在数据可视化中的作用与应用原则方面的研究逐渐出现在研究者视野中。2014 年刘智慧等^[49]基于数据的 5V 特征(Volume、Variety、Velocity、Value、Veracity)提出在数据可视化中应注意信息分级原则,设计师在面向可视化设计时应注意其显示中的版式图形设计、色彩搭配、插图运用等方面,强调作品功能性的基础上应该良好平衡其艺术性,从而防止数据过载、防止思维过度发散等技术要点;Quispel 等^[50]基于设计师视角对可视化美学进行研究,提出数据来源的可靠性与通用性会影响到可视化的效果,因此,在进行可视化设计时应遵循数据可靠性与通用性原则;田雷等基于大数据背景之下结合形式美法则,选取可视化中形状与色彩 2 个因素对形式美法则的关联性进行研究,探讨了美学在信息图设计中的重要性;陈伟峰提出在信息传达过程中的良好展示与数据传达的准确性是可视化设计中的首要任务,为了保证数据交互中操作的直观性、易理解性和易记忆性,他将可视化的美学法则提炼为聚焦、平衡、简单等三个方面;于静等^[51]指出可视化视觉编码所依赖的最基本视觉心理是格式塔法则。

由此可见,早期可视化美学应用原则上主要有六个方面,分别是:形式美法则;多样统一性原则;最大效果的最小手段原则;统一的多样性原则;最先进的但可接受原则;最佳匹配原则。随着对数据特征的深入研究,部分学者提出基于数据特征的可视化美学原则四个方面,分别是:表达性和有效性原则;可靠性与稳定性原则;信息分级原则;格式塔原则。

3.2 传统美学与数据可视化中设计美学评价异同

我国传统美学评价可追溯到新石器时期和先秦时期的美学思想,新石器的出现标志着人们对美的意识的形成,但并未形成相应的美学评价体系,到了先秦时期则出现了有关美的评价,如孔子的“中和之美”、老子的“美言可以市尊”、荀子的“万物之美可以养乐”,但这些都是从日常言行上对美展开讨论。到了战国时期,《考工记》从工艺角度提出“材有美”、继而到魏晋南北朝时期,书法美术作品的盛行催生了“传神写照”“气韵生动”“得意忘象”等美学观点;明清时期则出现了诸多关于工艺设计的美学讨论,如丁佩提出的“能、巧、妙、神”美学原则等。

国外的审美评价可追溯到石器与岩画的出现时期。西方主要是以哲学研究为代表的审美体系形成,如亚里士多德提出“美的主要形式是秩序、均匀和确定性”,随着文明的觉醒与艺术的发展,出现了专业的艺术史家,如西塞罗提出“适宜”的美学概念,到了中世纪,由于宗教的影响哥特式风格崛起,再到工业革命时期水晶宫博览会引发的功能与形式的长期讨论。由此可见,传统美学研究的对象通常指工艺美术作品相关范畴,审美评价的主观性较高,在发展中又根据不同国家的文化与发展历史不同,呈现出了不同的特点^[52]。

与传统美学评价相比,数据可视化中的设计美学评价多是依托大数据与人机智能协同评价的结果,呈现出更加智能高效与客观精准等特点。随着数据可视化审美对象范畴的扩展,其审美评价对象除了数据可视化的视觉审美以外,还包含了用户获取数据的整个范畴,如数据加工流程中所涉及的环境美学、交互美学和可视化形式背后体现的文化品位、艺术形式及风格等精神美学方面的研究^[53]。由此可见,传统美学与数据可视化中的审美评价在以人为中心的审美感受层次与情感体验上又呈现出趋同性,在对象、方式、过程等方面又各不相同,见表 3。

表 3 传统审美评价与数据可视化审美评价异同
Tab.3 Differences evaluation between traditional aesthetic and data visual aesthetic

分类	评价范畴	时期	代表观点	评价方式
传统美学评价	美术、书法、工艺品、文学作品等,以视觉审美为主。	新石器 春秋 战国 魏晋南北朝 明清 现代	有美的意识但缺乏审美评价 孔子“中和之美” 老子“美言可以市尊” 以《考工记》为代表 “传神写照”“气韵生动”“得意忘象”等 “能、巧、妙、神” “适宜”、功能与形式的辩证关系	主观提炼
数据可视化中美学评价	数据可视化形式与风格、交互方式、用户心理感知、可视化媒介等、任务完成率与精准性等。	18 世纪~至今	数据可视化中设计美学要素的应用应该在保证数据获取效率的前提下尽可能多地为用户创造良好的审美体验	科学测量、大数据背景下计算机智能迭代与评价

3.3 评价方法

数据可视化中的美学评价方法根据其应用领域、信息密度与时空维度不同, 其评价方法会随研究对象中的关键指标因子与指标权重而发生一定变化。整体来看, 数据可视化美学评价方法多是采用心理学与感性工学领域的相关研究方法, 借助生电类监测设备、人工智能学习系统与统计学相关方法, 对用户在数据可视化过程中诸如视觉吸引力、美感体验、任务完成与延迟率、精准性等方面进行数据采集, 进而进行对比分析与评价^[54]。

在视觉美学评价方面, 基于视觉通道的数据可视化美学评价方法, 主要是围绕图形学相关要素对用户获取数据过程中视觉美感与情感体验等方面进行综合评估。Nguyen 等^[55]提出图形可视化中包括三个方面忠实性指标: 信息表现的忠实性、任务的支持度和数据微变化的敏感度; 阮杰等^[56]发明公开了一种基于跨模态协同推理的图像美学质量评价的方法; 郭斌等^[57]提出现阶段视觉美学度量工作主要集中在数字图像作品美感度量、情感度量, 以及基于信息论的美学评价, 主要包括视觉美学美感与情感的评价、基于信息论的美学评价即结合信息论挖掘分析美学规律; 姜家俊通过分阶段多任务训练方式提出基于多任务的个性化美学评分系统 MTPAA。

在美感体验中, Lau 等^[44]提出信息美学主要由数据、交互和美学三个方面构成, 并根据这三点提出了信息美学模型, 见图 6。Andrea Lau 提出该模型可以被来自不同领域的可视化设计者使用, 信息可视化相关美学效果评估应综合考虑这三个方面因素。但随着

交互技术的进步, 用户多重感官的参与度不断提高, 数据可视化的评价方法不仅局限于视觉吸引, 如可视化美学中听觉方面的研究多是在视觉评价的基础上, 利用已有的量化工具分析不同环境下声音的类别、声量大小和形式对用户情感唤醒、判断与决策等方面的影响。如针对情绪效价、情绪唤醒度开发、测量体验情感方面的“日内瓦情感轮”。

在任务完成效率方面, 可从任务完成时间、放弃和延迟指标、精准性等方面进行展开。如 Tractinsky 等^[58]通过隐式反应延迟测量, 验证了网页界面的审美感知研究的结果; Cawthon 等^[59]选取了 11 种数据可视化图形并将元素拆分后通过对 285 名参与者的主观输入, 建立了数据可视化技术的定量排序, 通过迫使受测者使用这些数据可视化技术, 对数据可视化中美学和可用性的影响进行分析, 验证了美学和有效性的客观指标, 以及错误反应中任务放弃和延迟的指标; Andrew Vande Moere^[60]提到衡量信息可视化的“成功”通常是主观和高度复杂的, 评价信息可视化的“成功”的标准应该在效用、可靠性和吸引力等方面之间达成一个平衡, 其中吸引力并不局限于视觉形式, 它还包括原创性、创新性、新颖性等模糊方面, 以及构成用户体验的其他主观因素。

虽然众多学者基于不同的视角对数据可视化中的美学评价进行了探索与验证, 但美学和艺术相关原则总是会随着时间推移和社会背景的不同发生根本性变化, 大众审美会随着技术的发展与体验维度的扩展而发生系列变化^[61], 在某个时刻被认为是美丽的, 在另一个时刻可能很快被认为是丑陋的, 正如叶朗^[62]在《美学原理》中提到“美是历史的范畴, 没有永恒的美”, 人们很难就一套普遍的美学维度达成一致^[63]。

4 数据可视化中设计美学研究展望

4.1 基于多感官交互的叙事型数据可视化设计

技术的进步使人们能够利用多种媒介超越物理时空的局限, 为用户创造更多的数据可视化体验, 并增强用户对数据获取场景的记忆, 增强情景记忆中事实与情感的链接力, 延长用户在面向复杂数据时的注意时长, 降低认知负荷与记忆负荷。良好的数据可视化除了体现在对数据的快速读取与识别之外, 还包括对数据的回忆与识记, 为了使数据信息转化为知识, 便于识记并唤醒用户相应的情感, 2010 年 Segel 和 Heer 提出将信息可视化与讲故事机制相结合, 用讲故事的方式帮助用户在所表示的复杂数据之间建立联系以帮助用户识记与回忆, 即“叙事可视化”^[64]。

在数据叙事可视化中主要包括探索数据、制造故事和叙述故事这 3 个阶段^[65]。然而目前数据叙事可视化的研究多是与视觉通道相关, 基于多感官交互的叙事型数据可视化设计研究报道较少。多感官交互下的

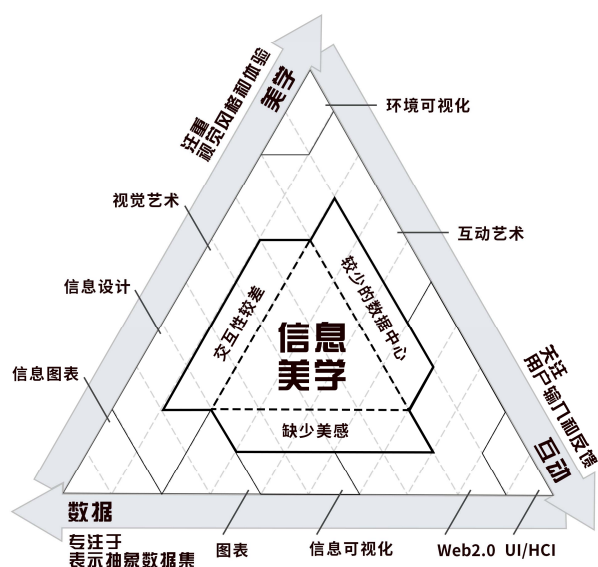


图 6 信息美学模型

Fig.6 Model of Information Aesthetics

叙事型数据可视化是通过调动用户多重感官通道,将数据转化为视觉共享的线性或者非线性叙事故事的形式,以增强用户的情感体验与黏度^[64],是在虚拟现实技术的基础上将视觉传输转化为数据体验,目标在于为用户创造更好的可视化感受^[66]。2020年初韩国MBC电视台播出的节目《遇见你》,为了帮助一位失去自己女儿的母亲实现与女儿好好告别的愿望,节目组利用当事人提供的照片结合智能计算对其女儿的身高、年龄、面部特征等数据进行计算得出其女儿现阶段可能存在的形象后,利用虚拟现实技术设计相关场景让当事人母亲与过世的女儿进行互动,在弥补了这位母亲遗憾的同时,引爆了无数人的泪点,见图7。



图7 《遇见你》母女重见场景

Fig.7 "Meet You": the mother met her daughter again

4.2 基于自然数据的可视化美学评价机制研究

脑机接口、移动计算、可穿戴计算、通信技术、传感技术等先进技术的发展为数据可视化交互方式升级提供了强大的技术支撑,与问卷法、访谈法等传统方法所得到的数据相比,模拟场景下用户无意识的表情、情绪、姿态、生理信号等自然数据最能表示用户的真实状态,目前基于自然数据的收集与分析技术相对丰富,但在数据可视化美学评价中的应用相对较少。

数据可视化美学评价机制建设过程中需融合不同学者基于多种感官的美学评价方法,根据实际应用场景从主客观与人机融合角度,搭建相对完整的数据可视化美学评价机制架构与体系;构建合理的自然数据采集标准并探索更高的数据融合方式,关注不同数据类别的时间顺序特点与周围环境之间的关系,对自然数据间的语义相关性的挖掘与获取进行深入研究,建立不同数据之间的映射关系,提高自然数据的准确率;深入洞察用户在数据可视化美学需求背后的数据认知习惯与情感诉求,关注用户外显行为背后内隐数据所呈现出的规律特征;提升多维度大规模数据的有效降维率,分析不同的数据可视化应用领域并进行归类,在合并同类或相似领域的同时,拉开不同类型领域的差异化与层次。

4.3 多维空间中数据动态协同下美学形式一致性研究

虚拟现实技术的普及,使大量的数据符号转变为可实时动态交互的虚拟场景与可视化模型,用户在获取信息的过程中可以利用各种虚拟辅助设备从不同角度查看这些“可见的”数据并与之进行互动。在交互过程中,其关键要素、感官刺激源与交互关系都会随之变化,相比物理空间中依托纸媒和数屏以视觉刺激中的色、形、比例等为主的数据可视化形式,虚拟空间多强调空间、方向与平衡等要素。此外,用户在使用过程中,在感官交互层面会由物理空间中基于视觉识别次序型互动关系,转向数字虚拟空间中基于重力感应与体感检测的触摸、语音、用户位移等自然语言的动态协同。

随着用户自身对可视化形式的参与度与控制度的提高,数据间的联系与差别会随着用户向虚拟多维空间转换而放大,用户的感受力与接受力也会变得更敏感直接。因此,海量数据中多维空间的数据转换,对用户适应力与反应敏感度等方面均提出了更高的要求,如何根据数据与其应用领域特征、目标用户的认知模式为之设计相匹配的场景与互动方式,从而保持数据可视化形式美学上的一致性,对降低用户在数据获取过程中空间转换所造成的感知觉不适性、提高可视化交互的流畅性与数据获取有效率、良好的体验感受等方面至关重要。

4.4 基于计算概念谱系的数据可视化设计美学研究

数据可视化中的设计美学主要是计算机学科背景下以用户为中心,以数据识记为目的,借助人工智能技术与设计等手段,对能被用户感知的数据可视化形式进行表现与迭代。其中,计算机概念谱系可细分为算势、算力、算术、算法、算礼等内容,移动设备与数字技术的普及,越来越多的数据场景对人机交互中设备的延迟速度提出了更高要求。其中算力作为人工智能发展的关键技术支撑,其服务效果决定了数据传输与用户识别的精准性与高效性、可视化美学形式转换的流畅性、用户的体验感等方面,足够的算势是数据可视化相关程序或计算任务能够运行的基础,算法通常用来解决常规性可视化运算问题,算礼是关于计算如何在计算机系统上进行的制度规范,更关注计算机系统的整体。

目前,数据可视化形式的研究多集中在视觉图形界面的表现与交互方面,对于计算机谱系与可视化形式间的关系与相互作用并未进行过多阐释^[67],而计算机谱系中不同的部分对数据可视化美学研究影响又各不相同。因此,厘清计算机概念谱系与数据可视化设计美学研究间的关系,找到其对应关系并进行优化,对数据可视化美学形式与数据获取有效性等方面的提升意义重大^[68]。

5 结语

数据可视化中设计美学研究的发展,是可视化技术不断完善与全民审美水平日渐提高的背景下,用户需求不断深化与丰富的表现,其目的仍是提升用户在数据获取与识记过程中的高效性与体验性。作为计算机学科中的数据可视化与艺术学科下的设计美学研究,更应该以数据的高效获取为目标、以数字化技术与美学设计为手段、以体验升级为重点,利用人工智能相关技术将客观数据与用户主观判断有机融合,不断深化数据可视化中设计美学相关领域的研究,为用户创造更好、更高效的数据获取体验。未来随着元宇宙与虚拟现实混合技术的发展,多维空间中数据动态协同下美学形式一致性研究、基于用户偏好的叙事型交互场景搭建、多感官交互下交互模式创新,以及与之配套的评价机制等方面的研究,将逐渐成为数据可视化美学研究中的热点问题。

参考文献:

- [1] STEELE NOAH J. 数据可视化之美[M]. 祝洪凯, 李妹芳, 译. 北京: 机械工业出版社, 2011.
STEELE J, ILIINSKY N. [M]. ZHU Hong-kai, LI Meifang, Translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [2] 曾悠. 大数据时代背景下的数据可视化概念研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
ZENG You. The Concept Study of Data Visualization under the Ackground of Big Data[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [3] STEVENS S S. On the Theory of Scales of Measurement[J]. Science, 1946, 103(2684): 677-680.
- [4] SHNEIDERMAN B. The Eyes Have It: A Task by Data Type Taxonomy for Information Visualizations[J]. Proceedings 1996 IEEE Symposium on Visual Languages, 1996: 336-343.
- [5] LEI T, NI N, ZHU Q, et al. Aesthetic Experimental Study on Information Visualization Design Under the Background of Big Data[C]// International Conference of Design, User Experience, and Usability. Switzerland: Springer, Cham, 2018: 218-226.
- [6] 陈为, 沈则潜, 陶煜波, 等. 数据可视化[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
CHEN Wei, SHEN Ze-qian, TAO Yu-bo, et al. Data Visualization[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019.
- [7] 孙东伟, 刘滨. 数据可视化研究与技术实现[J]. 产业与科技论坛, 2020, 19(19): 40-42.
SUN Dong-wei, LIU Bin. Research and Technical Realization of Data Visualization[J]. Industrial & Science Tribune, 2020, 19(19): 40-42.
- [8] 郑娅峰, 赵亚宁, 白雪, 等. 教育大数据可视化研究综述[J]. 计算机科学与探索, 2021, 15(3): 403-422.
ZHENG Ya-feng, ZHAO Ya-ning, BAI Xue, et al. Survey of Big Data Visualization in Education[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2021, 15(3): 403-422.
- [9] 刘书含, 翁荻, 巫英才. 工业数据可视分析综述[J]. 集成技术, 2021, 10(6): 3-19.
LIU Shu-han, WENG Di, WU Ying-cai. A Review on Industrial Data Visual Analytics[J]. Journal of Integration Technology, 2021, 10(6): 3-19.
- [10] 王艺, 任淑霞. 医疗大数据可视化研究综述[J]. 计算机科学与探索, 2017, 11(5): 681-699.
WANG Yi, REN Shu-xia. Survey on Visualization of Medical Big Data[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2017, 11(5): 681-699.
- [11] JO D, KIM G J. AR Enabled IoT for a Smart and Interactive Environment: A Survey and Future Directions[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(19): 4330.
- [12] 陈笑洋. 数据可视化理论在时空数据上的设计实现[D]. 天津: 南开大学, 2021.
CHEN Xiao-yang. Design and Realization of Data Visualization Theory on Spatio-Temporal Data[D]. Tianjin: Nankai University, 2021.
- [13] 雷婉婧. 数据可视化发展历程研究[J]. 电子技术与软件工程, 2017(12): 195-196.
LEI Wan-jing. Research on the Development of Data Visualization[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2017(12): 195-196.
- [14] 芮小平, 赵扬, 杨崇俊, 等. 空间信息多维可视化技术综述[J]. 小型微型计算机系统, 2004, 25(9): 1636-1640.
RUI Xiao-ping, ZHAO Yang, YAMG Chong-jun, et al. Survey on the Visualization of Multidimensional Spatial Information[J]. Mini-Micro Systems, 2004, 25(9): 1636-1640.
- [15] 刘滨, 刘增杰, 刘宇, 等. 数据可视化研究综述[J]. 河北科技大学学报, 2021, 42(6): 643-654.
LIU Bin, LIU Zeng-jie, LIU Yu, et al. Review of Data Visualization Research[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2021, 42(6): 643-654.
- [16] JO J, KIM W, YOO S, et al. Swiftuna: Responsive and Incremental Visual Exploration of Large-scale Multidimensional Data[C]// 2017 IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis). Seoul: IEEE, 2017.
- [17] ARAR R. Nostalgia: A Human-machine Transliteration[C]// 2018 IEEE VIS Arts Program. Berlin: IEEE, 2018.
- [18] Tory M, Moller T. Rethinking visualization: A high-level taxonomy[C]// IEEE Symposium on Information Visualization. Berlin: IEEE, 2004.
- [19] LI Cheng, TONG Xin, SHEN Han-wei. Virtual Retractor: An Interactive Data Exploration System Using Physically Based Deformation[C]// 2017 IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis). Seoul: IEEE, 2017.

- [20] JO D, KIM G J. ARIoT: Scalable Augmented Reality Framework for Interacting with Internet of Things Appliances everywhere[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2016, 62(3): 334-340.
- [21] KOSTOLANI M, MURÍN J, KOZÁK S. Intelligent Predictive Maintenance Control Using Augmented Reality[C]. 2019 22nd International Conference on Process Control (PC19). Berlin: IEEE, 2019.
- [22] 黑格尔. 美学[M]. 朱光潜, 译. 北京: 商务印书馆, 2011.
- G W F Hegel. Asthetik[M]. ZHU Guang-qian, Translated. Beijing: The Commercial Press, 2011.
- [23] 徐恒醇. 设计美学概论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2016.
- XU Heng-chun. Introduction to design aesthetics[M]. Beijing: Peking University Press, 2016.
- [24] 黄柏青. 设计美学[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
- HUANG Bo-qing. Design Aesthetics[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2016.
- [25] 张黔. 设计艺术美学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- ZHANG Qian. Aesthetics of Design arts[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [26] 梁梅. 设计美学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2016.
- LIANG Mei. Aesthetics of Design[M]. Beijing: Peking University Press, 2016.
- [27] 董霞. 设计美学研究述评——以中国教育背景下的设计美学研究为中心[D]. 景德镇: 景德镇陶瓷学院, 2013.
- DONG Xia. The Study on Design Aesthetics: Under the Background of Education in China[D]. Jingdezhen: Jingdezhen Ceramic Institute, 2013.
- [28] KOSARA R. Visualization criticism - the missing link between information visualization and art[C]// 2007 11th International Conference Information Visualization (IV '07). Zurich: IEEE, 2007.
- [29] BOYLE J, EICK S G, HEMMJE M, et al. Database Issues for Data Visualization: Interaction, User Interfaces, and Presentation[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1994: 25-34.
- [30] SCHENKMAN B N, JÖNSSON F U. Aesthetics and Preferences of Web Pages[J]. Behaviour & Information Technology, 2000, 19(5): 367-377.
- [31] TATEOSIAN L G, HEALEY C G, ENNS J T. Engaging Viewers through Nonphotorealistic Visualizations[C]// Proceedings of the 5th International Symposium on Non-photorealistic Animation and Rendering. San Diego, California. New York: ACM, 2007: 93-102.
- [32] DIAMOND S. Lenticular Galaxies: The Polyvalent Aesthetics of Data Visualization[J]. CTheory, 2010(1): 1-6.
- [33] MOERE A, SCHMIDT C, LIMA M S. Aesthetics in Information Visualization[J]. Trends in Information Visualization, 2009(1): 8.
- [34] KOSTELNICK C. The re-Emergence of Emotional Appeals in Interactive Data Visualization[J]. Technical Communication, 2016, 63(2): 116-135.
- [35] 胡俊. 神经美学视角下的快乐与审美体验[J]. 文艺理论研究, 2021, 41(3): 104-112.
- HU Jun. Pleasure and Aesthetic Experience from the Perspective of Neuroaesthetics[J]. Theoretical Studies in Literature and Art, 2021, 41(3): 104-112.
- [36] HARRISON L, REINECKE K, CHANG R. Infographic Aesthetics: Designing for the First Impression[C]// Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM, 2015.
- [37] YILMAZ S, SEIFERT C M. Creativity through Design Heuristics: A Case Study of Expert Product Design[J]. Design Studies, 2011, 32(4): 384-415.
- [38] 李东进, 李研, 武瑞娟. 产品设计领域的消费者审美体验[J]. 心理科学进展, 2013, 21(2): 336-346.
- LI Dong-jin, LI Yan, WU Rui-juan. Consumer Aesthetic Experience in Product Design[J]. Advances in Psychological Science, 2013, 21(2): 336-346.
- [39] 胡佳宝, 雷扬, 定险峰, 等. 大众与个人审美品位的认知与神经机制[J]. 心理科学进展, 2022, 30(2): 354-364.
- HU Jia-bao, LEI Yang, DING Xian-feng, et al. Shared Vs. Private Aesthetic Tastes: The Cognitive and Neural Mechanisms[J]. Advances in Psychological Science, 2022, 30(2): 354-364.
- [40] BERTIN J. Semiology of graphics[M]. Madison: University of Wisconsin Press, 1983.
- [41] HUSSAIN M, WILKINSON R. An Interface Between East and West[M]. Aldershot: Ashgate, 2006.
- [42] KONG SHU, SHEN XIAOHUI, LIN ZHE, et al. Photo Aesthetics Ranking Network with Attributes and Content Adaptation[EB/OL]. [2016-07-27][2022-01-10]. <https://arxiv.org/abs/1606.01621>.
- [43] 曾琼, 汪云海, 屠长河, 等. 面向数据可视化的色彩计算[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2020, 32(10): 1549-1559.
- ZENG Qiong, WANG Yun-hai, TU Chang-he, et al. Color Computing in Data Visualization[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2020, 32(10): 1549-1559.
- [44] LAU A, VANDE MOERE A. Towards a Model of Information Aesthetics in Information Visualization[C]// 2007 11th International Conference Information Visualization (IV '07). Zurich: IEEE, 2007.
- [45] BÜSCHEL W, REIPSCHLÄGER P, LANGNER R, et al. Investigating the Use of Spatial Interaction for 3D Data Visualization on Mobile Devices[C]// Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces. New York: ACM, 2017.
- [46] LANGNER R, SATKOWSKI M, BÜSCHEL W, et al. MARVIS: Combining Mobile Devices and Augmented Reality for Visual Data Analysis[C]// Proceedings of the

- 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM, 2021.
- [47] BOSELIE F, LEEUWENBERG E. Birkhoff Revisited: Beauty as a Function of Effect and Means[J]. The American Journal of Psychology, 1985, 98(1): 1-39.
- [48] HEKKERT P. Design Aesthetics: Principles of Pleasure in Design[J]. Psychology Science, 2006, 48(2): 157-172.
- [49] 刘智慧, 张泉灵. 大数据技术研究综述[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(6): 957-972.
- LIU Zhi-hui, ZHANG Quan-ling. Research Overview of Big Data Technology[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(6): 957-972.
- [50] QUISPEL A, MAES A, SCHILPEROORD J. Aesthetics and Clarity in Information Visualization: The Designer's Perspective[J]. Arts, 2018, 7(4): 72.
- [51] 于静, 赵璐, 史金玉, 等. 红色文化基因图谱的大数据可视化设计研究[J]. 装饰, 2021(9): 126-127.
- YU Jing, ZHAO Lu, SHI Jin-yu, et al. Research on Big Data Visualization Design for Memetic Mapping of Red Culture[J]. Art & Design, 2021(9): 126-127.
- [52] 曹耀明. 设计美学概论[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2004.
- CAO Yao-ming. A Survey of Design Arts[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2004.
- [53] VANDE MOERE A, TOMITSCH M, WIMMER C, et al. Evaluating the Effect of Style in Information Visualization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(12): 2739-2748.
- [54] MÖTTUS M, LAMAS D. Aesthetics of Interaction Design: A Literature Review[C]// Proceedings of the Multimedia, Interaction, Design and Innovation. New York: ACM, 2015: 1-10.
- [55] NGUYEN Q, EADES P, HONG S H. On the Faithfulness of Graph Visualizations[C]// Graph Drawing. Berlin, Berlin: Heidelberg, 2013: 566-568.
- [56] EADES P, HONG S H, KLEIN K, et al. Shape-Based Quality Metrics for Large Graph Visualization[C]// Graph Drawing and Network Visualization. New York: ACM: 2017.
- [57] 郭斌, 张秋韵, 方禹杨, 等. 计算美学: 计算科学驱动的视觉美学度量与生成[J]. 包装工程, 2021, 42(22): 62-77.
- GUO Bin, ZHANG Qiu-yun, FANG Yu-yang, et al. Computational Aesthetics: Visual Aesthetics Measurement and Generation Driven by Computational Science[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(22): 62-77.
- [58] LAVIE T, TRACTINSKY N. Assessing Dimensions of Perceived Visual Aesthetics of Web Sites[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2004, 60(3): 269-298.
- [59] CAWTHON N, MOERE A V. The effect of aesthetic on the usability of data visualization[C]// 2007 11th International Conference Information Visualization (IV '07). Zurich: IEEE, 2007.
- [60] MOERE A V, PURCHASE H. On the Role of Design in Information Visualization[J]. Information Visualization, 2011, 10(4): 356-371.
- [61] GOPNIK B. Aesthetic Science and Artistic Knowledge[M]. Oxford: Oxford University Press, 2011: 129-154.
- [62] 叶朗. 美学原理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2009.
- YE Lang. Foundations of aesthetics[M]. Beijing: Peking University Press, 2009.
- [63] FIGUEIRAS A. How to tell stories using visualization[C]// 2014 18th International Conference on Information Visualisation. Paris: IEEE, 2014.
- [64] OBIE H O, CHUA C, AVAZPOUR I, et al. A Study of the Effects of Narration on Comprehension and Memorability of Visualisations[J]. Journal of Computer Languages, 2019, 52: 113-124.
- [65] LEE B, RICHE N H, ISENBERG P, et al. More than Telling a Story: Transforming Data into Visually Shared Stories[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2015, 35(5): 84-90.
- [66] 王潇潇. 虚拟现实环境中的数据可视化设计[J]. 设计, 2019, 32(24): 115-117.
- WANG Xiao-xiao. Design of Data Visualization in Virtual Reality Environment[J]. Design, 2019, 32(24): 115-117.
- [67] 刘宇航, 张菲. 计算概念谱系: 算势、算力、算术、算法、算礼[J/OL]. 中国科学院院刊: 1-11[2022-08-23]. [https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CA](https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CA&P&dbname=CAPJLAST&filename=KYYX20220629002&uniplatform=NZKPT&v=IZ5BF9IAEfwp9m8RBxyzRk_DJenmUc1GxOS8M4Vlsm-g6DEurtPBO26iUN-SmrAsI)
- [68] 赵倩颖, 邢文娟, 雷波, 等. 算力时代下的算力服务需求与特征思考[J]. 信息通信技术, 2022, 16(2): 14-18.
- ZHAO Qian-ying, XING Wen-juan, LEI Bo, et al. Thoughts on Requirements and Characteristics of Computing Power Services in the Era of Computing Power[J]. Information and Communications Technologies, 2022, 16(2): 14-18.

责任编辑: 陈作