arXiv:2603.02498v1 [cs.HC] 3 Mar 2026

通过光标上的视觉上下文提升低视力人士的图表可访问性

Yotam Sechayk
东京大学
东京，日本
sechayk-yotam@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

Hennes Rave
明斯特大学
明斯特，德国
hennes.rave@uni-muenster.de

Max Rädler
乌尔姆大学
乌尔姆，德国
max.raedler@uni-ulm.de

Mark Colley
伦敦大学学院
伦敦，英国
m.colley@ucl.ac.uk

Zhongyi Zhou
谷歌
东京，日本
zhongyizhou@google.com

Ariel Shamir
赖希曼大学
赫兹利亚，以色列
arik@runi.ac.il

Takeo Igarashi
东京大学
东京，日本
takeo@acm.org

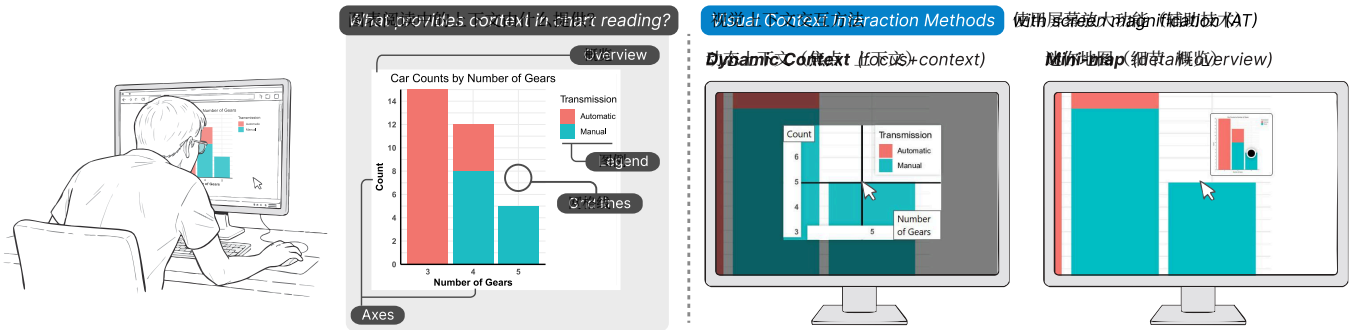


图1：我们提出的交互方法为低视力人士（LVI）提供了访问视觉上下文元素的途径。动态上下文受到焦点+上下文方法的启发，而迷你地图则受到概览+细节方法的启发。这两种交互方法均旨在与现有辅助工具（AT）（例如屏幕放大）集成。

摘要

尽管图表已被广泛使用，但低视力人士（LVI）仍难以访问图表。阅读图表需要在全局上下文中查看数据点，这对可能依赖放大功能或视野受限的低视力人士而言颇具难度。我们旨在通过提供对关键上下文的视觉访问来改善探索。为此，我们对五位低视力人士开展了形成性研究。我们确定了适用于各类图表的四种基本上下文元素：坐标轴、图例、网格线和概览。我们提出了两种基于指针的交互方法来提供这些上下文：动态上下文，一种新颖的焦点+上下文交互方式；以及迷你地图，它将概览+细节原则应用于低视力人士。在一项涉及N=22 位低视力人士的研究中，我们比较了这两种方法，并评估了它们与现有工具的集成情况。结果表明，动态上下文显著改善了视觉访问和可用性，并降低了努力程度；然而，它也增加了视觉负荷。迷你地图增强了空间理解，但在此任务中较不受青睐。我们提出了设计见解，以指导未来系统的开发，使其在平衡视觉负荷的同时，为低视力人士提供视觉上下文支持。

本作品采用知识共享署名4.0国际许可协议授权。*CHI '26*，西班牙巴塞罗那© 2026 版权由所有者/作者持有。ACM ISBN 979-8-4007-2278-3/2026/04
https://doi.org/10.1145/3772318.3791165

CCS概念

•**以人为中心的计算** → **无障碍系统与工具**; **可视化**;**交互设计实证研究**;**指向**; 人机交互实证研究; 用户研究; 可用性测试.

关键词

交互方法，低视力，视觉访问，可视化访问，辅助工具，混合方法，基于指针的交互，指针轨迹分析

ACM参考文献格式：
YotamSechayk, Hennes Rave, Max Rädler, Mark Colley, Zhongyi Zhou, Ariel Shamir 和 Takeo Igarashi。2026。通过光标上的视觉上下文提升低视力人士的图表可访问性。载于*2026*年计算机系统中的人为因素*CHI*会议论文集（*CHI '26*），*2026*年*4*月*13*日至*17*日，西班牙巴塞罗那。ACM，美国纽约州纽约市，21页。https://doi.org/10.1145/3772318. 3791165

1 引言

数据图表在传达信息方面无处不在 [3, 44]。然而，图表包含丰富的视觉信息，要求用户获取细粒度的详情，如数据点及其更广泛的上下文 [50, 60]。例如，理解堆叠条形图取决于将条形边缘与坐标轴数值对应起来、将颜色与图例联系起来，以及比较两个或更多条形。对于视力障碍人士而言，这尤其困难 [4, 74, 98, 109], 尽管

他们越来越普遍。全球数据 [13] 估计，2020 年有 5.53 亿人患有低视力；预计这一数字将大幅增加，因为仅中度和重度视力障碍预计到 2050 年就将影响 4.74 亿人。对于低视力人士（LVI）而言，访问图表仍然是一项挑战 [3, 74, 98]。访问受限会削弱信息公平，具体表现为限制人们获取丰富的视觉上下文，以及从可视化中获得的数据洞察 [60]——例如在卫生危机期间 [30]。

当前在提升视障人士图表可访问性方面的进展主要围绕非视觉访问展开，例如借助屏幕阅读器 [例如，12, 19, 28, 31, 64, 65, 85], 触觉／触感 [例如，37, 62, 64, 88], 或声音化技术 [例如， 20, 105]。然而，尽管许多研究将盲人与低视力人士归为一类 [59, 60], ，后者更倾向于利用残余视力来访问视觉媒体 [89]。因此，图表可访问性应超越非视觉访问 [60, 100], 并支持低视力人士独立解读数据 [47]。支持低视力人士视觉访问的辅助工具（AT）在很大程度上仅限于放大，从而提供对细节的访问。然而，这会在细节与上下文之间造成权衡。采用全屏放大时，放大区域之外的内容会消失 [45, 89]。相反，镜片式放大会在全屏中显示放大区域；然而，镜片本身会遮挡附近内容。因此，低视力人士常常需要不断平移到图表的不同区域或调整缩放级别，依靠记忆并构建心智模型来获取图表信息 [91]。对于复杂图表（例如包含众多类别或数据系列的图表），这一过程会愈发费力 [3]。我们的目标是在现有辅助技术使用情况中有效提供上下文，以支持图表阅读与探索，并保留低视力人士的视觉自主性。

为了探究低视力人士阅读图表时如何发挥视觉自主性并利用上下文，我们邀请五位参与者开展了一项形成性研究，以了解他们的视觉访问策略、辅助技术使用情况以及优先关注的上下文元素。为广泛覆盖各类图表，我们设计了一项包含 12 种常见图表类型的图表理解测试 [57, 70]。研究发现证实，低视力人士更倾向于借助辅助技术进行视觉访问 [89], ，尤其是使用放大和颜色滤镜。当前策略要求低视力人士投入大量努力，在图表中不断平移和缩放，以理解其结构并访问底层数据 [74, 98]。我们归纳出四种在各类图表中最常见的上下文元素，低视力人士会利用它们来访问数据：图例、坐标轴、网格线和整体视图。然而，定位坐标轴和图例往往需要猜测；网格线通常缺乏准确追踪所需的对比度；访问整体视图则需要不断调整缩放，这可能导致方向感丧失。这些研究发现凸显了在现有辅助技术策略基础上进行改进的必要性，并同时提供数据及其上下文的访问途径，从而有望保留视觉自主性并减少努力程度。由此引出我们的核心研究问题：如何在利用现有辅助技术对低视力人士的优势的同时，为他们提供上下文?

为回答这一问题，我们探索了两种交互方法：动态上下文和迷你地图（图1）。动态上下文是一种新颖的语义焦点+上下文启发式方法，可在用户指针周围生成紧凑的上下文元素视图。迷你地图则是一种为低视力人士改编的概览+细节启发式方法。这两种方法旨在与现有辅助技术协同工作，以增强当前的视觉访问策略。例如，当将指针悬停在线图表上时，使用动态上下文，用户无需平移即可同时查看某个数据点的纵轴值和横轴值。类似地，使用迷你地图，用户无需调整缩放即可识别当前视野之外的峰值或谷值。我们制作了一个原型来测试这些交互方法。当前研究的范围允许我们手动提取图表信息；不过，我们提出将自动提取 [36, 46, 108] 作为未来的研究方向。

我们与 N=22 位低视力人士（LVI）开展了一项对比研究，使用原型评估两种方法对可用性、努力程度以及图表问答中图表访问的影响，并将它们与现有策略的基线进行比较。为探索与现有辅助技术（AT）的集成，参与者在所有条件下均使用自己偏好的辅助技术。结果表明，动态上下文显著比基线更有用，降低了努力程度；与迷你地图和基线相比，参与者自我报告认为它显著提升了图表访问。迷你地图对这项任务的帮助较小；不过，参与者认可它有望提供有价值的空间上下文，帮助定位图表区域并提升其可发现性。重要的是，尽管动态上下文提升了图表访问，但也带来了视觉杂乱，尤其妨碍了有复视的参与者。基于研究发现，我们提出了设计见解，以开发能够支持低视力人士视觉自主性的工具：无缝提供视野之外的视觉上下文，同时兼顾视觉杂乱。所有代码和数据均已通过项目页面[1]公开。

贡献声明：

- 来自一项与五名低视力人士开展的**形成性研究** 的见解，探讨他们如何获取图表、面临的挑战、所使用的上下文，以及不同图表类型之间的差异。
- **两种交互方法**：动态上下文，一种受语义焦点+上下文启发的新方法；以及迷你地图，一种受概览+细节启发并针对低视力人士进行适配的方法。
- 来自一项比较评估的**实证研究发现**： 22名低视力人士使用我们的原型实现，完成涵盖12种图表类型的既有图表问答任务。
- 可操作的**设计见解**，用于开发未来的辅助技术，在信息密集型任务中为低视力人士提供视觉上下文。

2 相关工作

2.1 低视力辅助工具

低视力涵盖一系列无法通过眼镜、药物或手术完全矫正的视力障碍，可能包括视敏度下降、视野受限、光敏感或色觉缺陷（CVD） [76, 89, 97]。为了访问数字内容，低视力人士会使用设备内置的辅助技术或第三方辅助技术 [3, 23], ，这些技术大致可分为三类：尺寸调整、视觉样式调整和感官模态转换。这些辅助技术并非只能单独使用，低视力人士通常会将其结合使用 [89]。

[7, 尺寸调整通过放大镜61], [9], 浏览器缩放或组件级尺寸调整（例如图标、文本）来放大屏幕元素 [82]。以往研究提出了一些方法，旨在减少浏览放大后的视觉内容时的繁琐操作[10, 55], [54], [83] 适用于网页办公应用或演示视频等场景。视觉

[1]https://visual-context.github.io/

样式调整通过高对比度主题、反转或美学色彩滤镜来改变呈现方式 [25], ，通常还会结合个性化设置 [79, 83, 106] ，以满足各种视觉状况的需求。感官模态转换着重于非视觉访问方式，例如文本转语音或触觉工具。文本转语音的形式多样，既包括选择性文本转语音 [89] ，也包括完整的屏幕阅读器 [18]。触觉工具通常是盲文显示器 [53, 71], ，近年来也包括利用 3D打印进行的触觉制造 [34, 37, 62, 78]。

随着增强现实和眼动追踪等技术的最新进展，一些研究开始探索如何利用视觉辅助增强来帮助低视力人士。例如，在头戴式增强现实设备中使用箭头、轮廓或其他视觉装饰，帮助低视力人士进行户外跑步 [1], 购买杂货 [107], 或与触摸面板交互 [52] 等活动。其他研究则调整了现有的无障碍设计范式，利用增强现实实现现实物体的屏幕放大 [106]。针对低视力人士使用眼动追踪技术，Wang 等人[96] 开发了*GazePrompt*，利用视觉增强来改善阅读体验。这些研究会呈现视觉高亮 ，让低视力人士更容易看到其视野中的难辨元素。

我们的工作延伸了这种视觉增强方法；不过，我们并非进行高亮，而是将低视力人士视野之外的元素叠加到其视野内，呈现为紧凑且一致的布局。为了贴合低视力人士目前使用辅助技术的方式，我们的方法旨在与现有辅助技术结合，从而带来更佳且可个性化的图表阅读体验。

2.2 焦点、概览、上下文和细节

在查看感兴趣元素的细节与保持其更广泛上下文中的定位之间存在权衡 [17, 21]。研究探索了两种平衡这一权衡的主要范式：概览+细节和焦点+上下文。概览+细节界面会在详细视图旁呈现一个较小的概览，用于指示当前焦点在整体内容中的位置 [8, 42]。由于两个视图彼此分离，用户可以分别与之交互，但在一个视图中的操作通常会同步反映到另一个视图中。这类界面通常与缩放结合使用，以支持导航 [16] ，也已扩展到沉浸式3D环境中 [104]。其中一种变体是透镜——覆盖在主视图上的可移动区域，用于放大 [6]或转换 [90] 内容——实际上沿 z 轴（深度）将概览与细节分离。

焦点+上下文界面将所有区域整合到单一显示中，通常通过鱼眼视图或差异缩放来实现，并有意扭曲呈现方式 [33, 41, 81]。这种方法通过同时保留焦点和上下文，降低了短期记忆负荷 [21]。失真处理的替代方案包括半透明混合 [72] 或语义缩放，后者会根据内容类型调整呈现方式 [2]。其他方法则利用用户意图，例如在探索地图时使用指针速度在上下文与焦点之间进行切换 [72], ，或在阅读大型文档时将滚动速度映射为放大级别的变化 [43]。

尽管这些范式改善了视力正常者的导航、定位 [42, 104],和探索 [86] ，但很少有研究考察它们对低视力人士 [45]的影响。对于低视力人士而言，将信息纳入受限的视觉空间 [17, 91] 这一挑战，还因视敏度、视野或颜色感知 [89]下降而加剧。因此，现有设计可能无法满足他们的需求。在本研究中，我们从低视力人士的视角重新审视概览+—细节和焦点+—上下文，并探讨针对这一群体所需的必要调整。

2.3 面向低视力的图表可访问性

使图表具备可访问性仍然是一项重大挑战 [27, 50]。近来，人们正努力让图表得到更广泛的访问。Marriott 等人 [60] 揭示了可视化可访问性工作中的差距，并强调了提升可视化访问的机遇——例如开发新的交互模式。Elavsky 等人 [27] 开发了 *Chartability*，一套用于制作无障碍可视化的启发式准则。Chartability 的开发深深植根于研究与丰富的现实经验。他们提出了视觉访问的多项要求，例如屏幕阅读器或放大支持、足够的颜色对比度、适当的间距，以及避免妨碍辅助技术的使用。然而，针对视力障碍人士的可访问性工作通常以非视觉访问为中心 [60, 100]。当前的可访问性方法包括文本描述（例如 longdesc 属性 [93]）、纳入数据表 [3, 64], 、通过屏幕阅读器进行层级导航 [12, 109], ，以及基于 ARIA 的图表注释等新兴框架 [94]。其他模态包括触觉图形 [85], 、触觉技术 [88], 以及多模态界面（例如音频与语音导航 [105]）。最近，大语言模型（大语言模型）已被探索作为通过对话代理实现个性化图表访问的一种手段 [35, 49, 84]。

与非视觉访问相比，很少有研究探讨低视力人士在阅读图表时如何利用残余视力。Prakash 等人 [74]通过基于网络的放大镜研究了用户与五种类型条形图的交互，发现模糊和干扰条会导致频繁误判，而堆叠或未对齐的条会增加感知错误。他们建议未来探索自动平移至图表关键区域（例如坐标轴标签、条形顶部）。Alcaraz-Martínez 等人[3] 比较了三个网页图表符合和不符合网页内容无障碍指南 [95] 的版本，结果表明，无障碍设计提升了效率、效果和满意度，同时也揭示了图例大小、工具提示遮挡和标签标注等尚存障碍。Wang 等人 [98] 研究了真实环境中的辅助技术可视化使用，记录了低视力人士如何依靠放大和先验知识拼合局部视图，以及即使图表已实现无障碍，他们仍会面临与颜色相关的挑战。只有少数研究开发了针对低视力人士独特需求的辅助技术。例如，用于数学图形的音频图形界面 [26] ，以及 *GraphLite* 等智能手机工具；后者可将静态条形图转换为可个性化定制的交互式视图 [73]。

在这项工作中，我们提出了一种新颖的方法，着重提供图表上下文的访问，以改善低视力人士的图表可访问性。尽管上下文访问对于解读图表至关重要， [87], 以往的研究却未探讨如何将上下文融入低视力人士的图表阅读体验。

2.4 图表理解

成功理解图表依赖于可视化素养，Lee 等人将其定义为 [57, 第 552] 页所述：*“[……] 在数据可视化中阅读和解读以视觉形式呈现的数据，并从中提取信息的能力与技能*

。”他们提出了可视化素养评估测试（VLAT），这是一项用于量化用户可视化素养的标准化测试。该测试包含 12 种可视化类型，共 53 道题。由于完整的 VLAT 篇幅较长，Pandey 和 Ottley[70]推出了 Mini-VLAT，这是一种简短版本（12 道题），在保持可靠性的同时，与完整的 VLAT 高度相关。

研究凸显了人们使用数据显示屏时面临的障碍及所采用的策略。Nobre 等人 [67] 研究了限制可视化素养的障碍，并强调了无障碍设计和教学的必要性。其他研究不再局限于准确性，而是探讨人们在视觉问题解决任务中采用的策略 [56, 63]。研究发现表明，需要自适应界面来满足不同用户的需求。正式教学也发挥着作用：相关研究考察了学生在可视化课程中学到的内容 [39], 、认知特征与可视化素养之间的关联 [58],，以及自适应评估如何更准确地衡量个人技能水平 [24]。这些研究表明，可视化能力受到个体差异的影响，凸显了个性化教育和评估策略的价值。相关研究比较了学生在科学情境与日常情境中的图表解读技能 [11], ，而 *Treeducation* 等系统则教授特定的可视化概念，例如树图布局 [32]。此外，Omelchenko 等人 [69] 证明，针对乌克兰语使用者进行文化适配的 Mini-VLAT 显著提高了评估准确性，凸显了因地制宜进行适配的重要性。

我们使用 Mini-VLAT，因为它：（1）提供了业界认可的标准化基线，便于进行比较；（2）经过心理测量学验证，因此能够减少测量噪声；（3）在多条件可用性研究中最大限度地减轻参与者负担，同时允许我们控制或考察个体差异。

3 形成性评估

为了了解低视力人士希望借助哪些工具来支持图表阅读，我们对五位低视力人士进行了形成性评估。尽管先前的工作通过探索性检查揭示了低视力人士如何体验图表 [3, 74, 98],，我们使用 Mini-VLAT [70] ，因为它涵盖的图表范围更广 [57]。我们的目标是了解视觉访问策略和辅助技术使用情况，确定低视力人士使用哪些上下文，以及不同图表类型之间是否存在差异。

3.1 参与者

我们通过个人关系招募了五名低视力人士（LVI）参与者，其中两名男性、三名女性，年龄为28至42岁（$M = 33.8$, $SD = 5.07$），详见表1。所有参与者均自述有低视力，并倾向于使用残余视力访问视觉媒体。四名参与者会在自己的设备上积极使用屏幕放大软件（F1、F2、F4、F5），其中三名会使用颜色滤镜（F1、F4、F5）。F1和F4偶尔会使用屏幕阅读器，但在研究期间没有使用。本研究通过Zoom在线开展，持续约50分钟（$M = 47.2$, $SD = 9.1$）。参与者获得了20美元的报酬。本研究经本机构的机构审查委员会（IRB）批准。研究开始前，参与者均提供了知情同意，并充分了解研究目的及数据用途。

3.2 流程

在取得知情同意后，我们首先进行了前测问卷，内容涵盖参与者人口统计信息、视觉状况、辅助技术（AT）的使用情况，以及参与者自我报告的图表熟悉度。在开始主要任务之前，我们详细介绍了Mini-VLAT的布局、结构和说明，以确保参与者充分理解。随后，参与者使用自己选择的辅助技术完成了Mini-VLAT[2] 。最后，我们进行了半结构化访谈，参与者在访谈中回顾了自己通过测试的PDF版本[3] 浏览不同图表时的体验。

在与 Mini-VLAT 交互并完成测试时，我们沿用了原始版本的界面和测试条件，包括随机问题顺序、跳过按钮，以及每道题 25 秒的时间限制 [70]。参与者完成测试后休息 5 分钟，随后继续研究。最后，我们进行了半结构化访谈，询问参与者对视觉访问的感受、所采用的策略，以及他们在访问图表时遇到的挑战。为反映辅助技术使用情况和不同图表类型，参与者通过一份包含所有图表和问题的 PDF 进行交互，以模拟通过不同媒介进行访问。这一环节没有时间限制，参与者可以自由切换问题。通过观察和反馈揭示策略与挑战，我们回应了本研究关于上下文的关键问题。

3.3 分析

参与者共享了屏幕和视频以供分析。F5遇到技术困难，无法共享其视频画面。访谈场次均被录制，并使用OpenAI Whisper [75] 在本地转录以供分析；第一作者根据录音手动纠正了所有转录错误。第一作者多次观看每段录音，系统分析其中的屏幕和视频部分。分析侧重于对辅助技术使用情况进行分类，并揭示访问模式。第一作者采用反思性主题分析 [14], 分析了转录文本和观看笔记，并以自身作为低视力人士的经历为视角来分析这些数据。

3.4 研究发现

参与者报告的图表熟悉程度各不相同，这反映在他们在Mini-VLAT中的表现上。参与者F1、F2和F4自我报告熟悉程度较高，每天都会在职业场景（F2）或教育场景（F1、F4）中与图表互动。F3报告熟悉程度为中等到较高，F5报告熟悉程度有限，接触的大多是通过新闻文章遇到的条形图或折线图。没有任何图表被所有参与者正确解答，也没有任何参与者正确回答堆叠条形图题目。六种图表类型——条形图、折线图和饼图，以及散点图、树状图和直方图——成功率最高，每种均有三名参与者正确解答。所有参与者的表现见表2。

25 秒的时间限制对参与者来说太短了。F1 和 F5 在 12 道题中有 8 道超时，F4 有 5 道，F2 和 F3 则有 3 道。所有参与者都表示，时间限制太短让他们感到挫败。F3 解释道：*“[*时间限制*]* 很令人恼火。

[2]https://washuvis.github.io/minivlat/（访问日期：2025年3月17日）[3] https://washuvis.github.io/minivlat/MiniVlatQUESTIONS_v1.pdf（访问日期：2025年3月17日）

表 1：形成性研究参与者人口统计信息。A/G：年龄与性别。CVD：色觉缺陷。O：发病（A=后天性，C=先天性）。LB：是否被认定为法定盲。MS：显示器尺寸。CF：图表熟悉度。性别：M（男性），F（女性）。

PID	A/G	确诊病症	O	色觉缺陷	LB	MS	CF
F1	28/F	斜视 , Chiari畸形	C	对比度降低	**T**	23"	5
F2	32/M	双侧青少年青光眼、白内障	C	–	**T**	32"	5
F3	30/F	视网膜色素变性、夜盲	C	–	**T**	27"	4
F4	42/F	白化病、眼球震颤、散光	C	光敏感	**T**	27"	5
F5	37/M	白化病、眼球震颤、散光	C	光敏感	**T**	16"	3

这让我更加意识到自己的残障。*[...]* 在学校时，我总能获得额外时间，现在我明白原因了。”不过，参与者也认识到，尽管延长时间是必要的，但仅仅提供额外时间并不能改善无障碍体验。F4 说：“多给我一些时间，我就能完成，*[...]* 但视觉影响仍然会更大。*[...]* 你会同时查看屏幕上许多不同的区域，对吧？这会让事情变得非常困难。”除了时间限制之外，我们还详细介绍了参与者的访问方式和辅助技术的使用情况，以及他们遇到的若干视觉挑战。

表2：形成性研究参与者的 Mini-VLAT 结果（✓=正确，✗=错误，TO=超时，SK=跳过）。每位参与者均以随机顺序完成相同的 12 个图表-问题对。得分计算遵循 Pandey 和 Ottley [70]的方法。

PID	✓	✗	TO	SK	得分
F1	4	–	8	–	4
F2	8	1	3	–	7.75
F3	7	2	3	–	6.5
F4	6	1	5	–	5.75
F5	1	3	8	–	0.25

3.4.1 当前辅助技术偏好。 视力较低的参与者使用了放大功能（F1、F2、F4、F5），其中 F1 使用停靠式放大镜面板，F2、F4 和 F5 使用全屏放大。F1 和 F4 将放大功能与基于浏览器的页面缩放结合使用；但是，他们在研究期间没有调整页面缩放比例。F2 使用了一个深色模式 浏览器扩展，将界面颜色反转，但由于对比度方面的问题，在测试进行到一半时将其关闭。F3 在研究期间没有使用任何辅助技术。所有使用辅助技术的参与者都表示，辅助技术带来了显著益处，例如动态放大（F4、F5）和颜色滤镜（F2）。在通过 PDF 进行反思时，F2 评论道：“我需要一张巨大而笨重、很难处理的纸。*[.....]* 幸好，如今我可以把所有事情都数字化处理。”同样，F4 表示：“我喜欢计算机，因为我可以根据需要把内容放大到任意程度；尤其是由于我的视力会波动，在状态良好时我可以把它调小一些，而感到有点疲惫时则调大一些。”

3.4.2 访问图表时的策略。 大多数参与者会先探索图表的布局来回答问题，采用类似的结构化方法，从标题开始，接着查看坐标轴或图例，然后查看数据。不过，F5 在回答某些问题时更倾向于采用探索式方法：“我想要先了解整体信息，再看答案，所以我没有时间去寻找实际答案。我一开始试图理解图表中的趋势，但有时问题与此无关，而我想先了解整体情况。”

所选策略还受到问题或图表类型以及参与者对该类型的熟悉程度影响。对于带有图例的图表，参与者通常会先查看图例，再看坐标轴。对于不熟悉或复杂的图表（例如气泡图），参与者会多次探索各个布局元素，然后才尝试回答问题。对于询问趋势的问题（例如“最常见的行程距离”），参与者会相应地调整策略。此外，图表之间的相似性可能导致混淆，并影响选择正确策略的能力。F1 解释道：“直方图对我来说很有挑战，因为它们在视觉上与条形图非常相似。有时我需要花些时间才能弄清楚自己看到的是哪种图表，以及应该寻找哪类信息。”

3.4.3 视觉导航挑战。 参与者提到了一些常见挑战，例如低对比度颜色，以及放大后出现的低分辨率图像 [3]，，还有因以局部片段的形式查看图表而产生的视觉导航挑战。我们概述了四个主题。

对手动操作的过度需求。参与者无法同时查看完整图表及其细节，必须使用鼠标指针在局部片段之间平移（F1、F2、F4、F5），或通过身体移动（F3）。F3 分享道，“以我的视野范围，我需要聚焦于不同区域，因此无法同时看到所有内容，只能通过身体移动并环顾绘图来浏览。”在局部片段之间切换时，参与者会借助图表的完整视图来定位。F2 解释道，“我的流程是先看整体概览，再找兴趣点，然后放大阅读。接下来，要么我已经知道下一个兴趣点在哪里，可以直接平移过去；要么就缩小视图找到它，再放大回去。”

布局不一致。参与者根据自己查看图表的经验，对各元素的位置有所预期。当图表中有坐标轴时，参与者会从左下角位置开始扫描，因为他们认为那里是起点。位置不一致（例如图例的位置）会导致努力程度白白增加，或错过信息。F4 解释道，*“[图例]* 的位置并不总是和我预期的一样。有时，有几张图表我甚至都没意识到有图例。”F3 指出，“图例的位置保持一致要好得多，*[...]* 我就不必花那么多力气去找‘该看哪里’。”

分散的上下文. 对参与者而言，分散的上下文使构建心理地图变得困难。F2解释道，“如果我正在看

一张包含多种内存分配操作的图表，我无法一次全部看完，必须多次查阅图例、坐标轴等等。”一张显示奥运奖牌数量的图表将图例嵌入了图表设计中。F3表示，“柱形颜色与奖牌颜色相匹配，这很好，我不需要看图例。”大多数参与者（F2、F3、F4、F5）表示希望将上下文放在数据附近或嵌入数据中。F2强调了这一需求，“这里有一个小图例，然后你必须前往 *[数据]*，，而现在，两条坐标轴都不在我的视野中，我已经忘记了图例。 *[...]* 我对正在看的内容没有任何上下文。”

追踪与比较。 大多数图表都要求参与者追踪数据点与坐标轴数值的对应关系，或比较不同数据点（例如，找出最大值或最小值）。谈到追踪，F2 解释道：“我得先盯着下面的数值，再向上平移到条形的高度，然后再回到下面，确认自己读对了距离，诸如此类。我没法同时看这些内容。”正如 F4 所指出的，放大后追踪会变得更加困难：“因为放大得更多，你得用鼠标沿着屏幕上的线移动更远的距离，所以必须更仔细地沿线追踪更长时间，才能获取信息。”同样，比较数据也颇具挑战性，参与者（F1、F2、F4）建议使用尺子作为视觉锚点。F4 评论道：“尤其是对于条形图，如果能有一把尺子会很有帮助，这样就更容易追踪了。”F3 会利用图表网格线作为尺子来追踪和比较，但大多数参与者因网格线对比度较低而没有注意到它们，只得改用其他方法。使用停靠式放大镜的 F1，则把停靠框的边界当作临时尺子来比较条形。

3.5 设计目标

我们的研究发现证实，低视力人士以局部片段的方式体验图表，并将大量努力用于平移、缩放以及构建信息的心理地图 [4, 98]。在图表中，低视力人士利用坐标轴和图例理解数据，借助整体概览 确定自己在数据中的位置，并将网格线作为追踪或比较数据的视觉锚点。因此，同时获取上下文和细节对于改善视觉访问至关重要。基于这些研究发现，我们为辅助技术制定了设计目标（DGs），以支持低视力人士
进行图表阅读。

- **DG1：** 让图表上下文易于获取：概览、图例、坐标轴和网格线。
- **DG2：** 减少视觉导航所需的努力程度。
- **DG3：** 支持不同的图表阅读策略。
- **DG4：** 灵活适应低视力人士不断变化的需求。

阅读图表时，LVI 需要付出大量努力：(1) 调整缩放级别以查看概览；(2) 平移以查看图例和坐标轴；(3) 在无法访问网格线的情况下追踪与比较信息（DG1）。如果图表布局不一致，LVI 就需要付出额外努力来查找上下文（例如图例）；而将上下文置于数据附近的紧凑布局，则能进一步减少所需努力（DG2）。LVI 对访问图表有不同的偏好策略，这些策略可能受到图表类型和图表熟悉度的影响（DG3）。最后，LVI 的访问需求多种多样且不断变化，无法通过一刀切的方法来满足（DG4）。

4 交互方法

基于我们的设计目标（§3.5），我们开发了两种交互方式原型：动态上下文和迷你地图。为了让坐标轴、图例、网格线和概览都易于访问（DG1），我们将它们投影到以指针为中心的紧凑且一致的区域内（DG2）。这两种方法都集成到现有辅助技术中，以支持不同的访问策略（DG3），并加入个性化设置来满足不断变化的用户需求（DG3）。本节将介绍这两种交互方式的原型实现。

该原型实现为基于网络的界面，使用 React [77]，并在用户指针周围的所谓概览区域（OA）内以视觉方式呈现上下文。目前的实现采用栅格化位图图表，并通过边界框标注图表上下文（图例和坐标轴）。这些标注目前由第一作者手动添加。[36, 46, 108]可以使用现有的分析方法自动完成这一手动流程；不过，由于这些方法并不完美，因此将其留作未来工作。两种交互方法都包含个性化设置，遵循现有针对低视力人士辅助技术的实践 [10, 73, 83, 106]。所有设置更改都会立即显示，遵循所见即所得（WYSIWYG）[4] 设计方法 [10]。

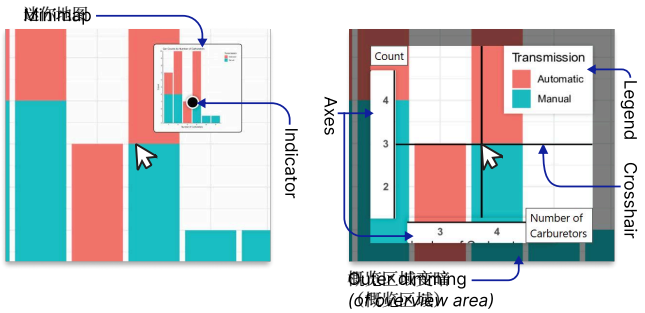


图2：迷你地图（左）和动态上下文（右）及其各自的组件。

4.1 动态上下文

动态上下文是一种受焦点+上下文方法启发的新型语义交互方法。我们将上下文信息投射到用户指针周围的一块紧凑区域中（图2）。当用户将指针悬停在图表上时，信息便会显示出来，其中包括三个核心上下文要素：坐标轴、图例和网格线。为更新上下文，我们会监听指针移动的变化。位置更新时，动态上下文会根据边界框标注和概览区域尺寸，利用投射的图表部分在叠加区域内显示上下文。例如，如果用户将指针指向柱状图顶部，该位置表示有三辆汽车（Y轴）和五个化油器（X轴），那么动态上下文区域的底部将显示以数值5为中心的X轴部分，左侧则显示以数值3为中心的Y轴部分。

为保留图表的视觉完整性，我们将坐标轴和图例投影到叠加区域。虽然在叠加区域内重建上下文

[4]“所见即所得” [99]

可以进一步提升无障碍体验（例如调整字体大小），但我们选择了这种方法来保留图表创建者的意图，因为重建并非总是可靠的 [73, 108]。X轴位于叠加区域底部，Y轴则紧贴左边缘。坐标轴标题分别位于叠加区域的右下方和左上方。图例位于叠加区域的右上角。投影后，坐标轴和图例均保留其在图表中的原始尺寸。为提供网格线的上下文，我们在叠加区域中心设置了一个十字准线状元素。

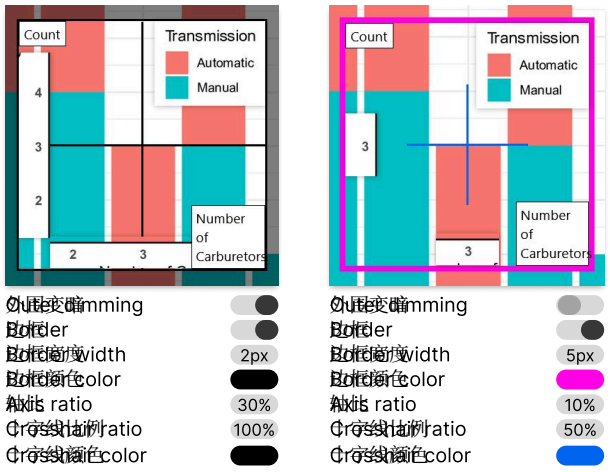


图3：动态上下文的默认配置（左），以及使用部分可用设置的另一种配置（右）。

4.1.1 用户自定义。 我们通过专用的设置窗口或用户交互提供可配置的设置。图3展示了动态上下文的默认配置和一种替代配置。首先，可以调整 OA 的尺寸（宽度和高度）。此外，用户还可以更改其边框、粗细和颜色，并控制外部变暗功能，使该区域之外的所有视觉内容变暗，以减少视觉杂乱。默认情况下，OA 内的上下文处于启用状态，用户可以通过左键单击指针将其开启或关闭。用户可以通过轴比 滑块调整投影坐标轴，该滑块控制投影到叠加区域中的坐标轴百分比，并以用户的指针为中心。例如，假设 $A_r = 0.3$ 是当前轴比值，那么在任意位置，坐标轴的 30% 都会被投影，其中指针两侧各占 15%。当 $A_r = 1$时，整个坐标轴将始终可见，且两条坐标轴会在叠加区域的左下角相交（图4）。对于网格线，可以调整其粗细、颜色和不透明度，也可以控制网格线相对于叠加区域的比例，即从指针位置延伸的距离。例如，设为 50% 时，垂直线将延伸至 OA 上下边缘和左右边缘的中点；设为 100% 时，网格线将延伸至 OA 的边缘。

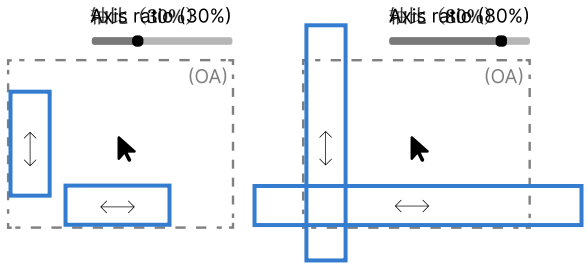


图4：不同轴比配置的示例。（左）值为30%，（右）值为80%。当坐标轴更大时
比叠加区域时，它们在其左下角相交。

4.2 迷你地图

迷你地图是面向低视力人士（LVI）对概览-细节视图的一种改编，旨在用户关注细节时提供图表的完整视图。为了提供概览式上下文，我们在 OA 内放置一个缩略图表视图（图2）。在缩略视图中，我们标示当前指针位置相对于图表的位置。迷你地图包含一个圆形指示器，用于指示用户指针在图表上的当前位置，这是概览-细节界面中的常见设计。该指示器会随指针移动，与动态上下文中上下文的更新方式类似。

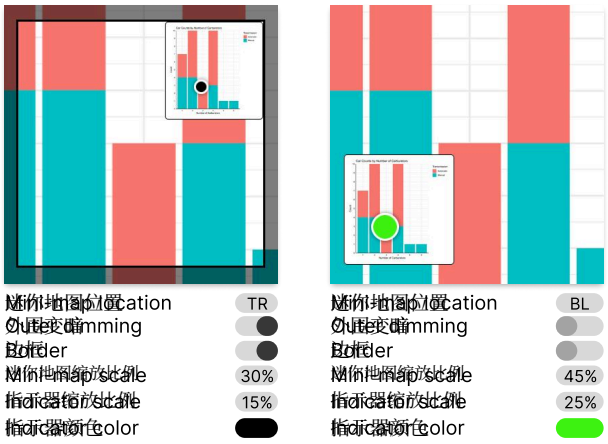


图5：迷你地图的默认配置（左），以及使用部分可用设置的另一种配置（右）。

4.2.1 用户自定义。 迷你地图与动态上下文采用相同的 OA 配置（尺寸、边框和外围调暗），并提供一些额外设置。图5展示了迷你地图的默认配置和另一种配置。与动态上下文类似，迷你地图的视觉效果默认开启，可通过鼠标左键单击切换开关。缩略视图的位置 可调整为与 OA 的四个角（左上、右上、左下、右下）中的任意一个对齐，其尺寸 可根据 OA 的宽度进行调整。位置指示器显示为

带有白色边框和阴影效果的圆形，其尺寸 和填充颜色 均可更改。

5 用户研究

为评估我们提出的交互方法（§4），我们开展了一项对比研究，设置了三种条件：基线、动态上下文和迷你地图。为保持外部效度，并探究我们的交互原型如何与现有辅助技术相结合，参与者在所有条件下均可选择使用任何辅助技术。鲜有研究探讨低视力人士在浏览复杂视觉界面时采用概览+细节和焦点+上下文方法的情况 [10]。因此，我们设计了这项研究，通过所提出的交互方法对这些方法进行比较。本研究围绕以下研究问题展开：

- **研究问题1：** 迷你地图或动态上下文能否提升效率和准确性？
- **研究问题2：** 迷你地图或动态上下文将如何影响辅助技术使用情况？
- **研究问题3：** 使用迷你地图或动态上下文后，图表阅读策略会发生变化吗？
- **研究问题4：** 迷你地图或动态上下文会如何影响可用性与工作负荷？
- **研究问题5：** 迷你地图或动态上下文会如何影响图表访问？

我们的研究问题基于若干假设提出。我们假设，使用跟随指针的紧凑布局来获取上下文，将提高图表访问效率，并提升准确回答测试问题的能力（研究问题1）。由于设计原型交互时考虑了与辅助技术的集成，我们假设这些交互不会改变参与者使用辅助技术的方式（RQ2）。图表上下文位于指针周围；因此，我们假设低视力人士访问图表的方式会发生变化，朝坐标轴或图例进行的导航操作会减少（RQ3）。同样，我们假设这些交互方式将降低工作负荷，并提升图表问答的可用性（研究问题4）。最后，我们假设紧凑、一致且可自定义的布局将增强图表访问感（研究问题5）。

5.1 参与者

我们通过面向盲人和低视力人士组织的公开帖子、封闭社群以及滚雪球抽样招募了22位低视力人士（表3）。参与者的年龄为23至66岁（$M = 41.4, SD = 14.2$），其中男性12人、女性8人、无性别者1人、非二元性别者1人。参与资格要求参与者年满18岁、患有低视力，并利用残余视力访问数字内容。4位参与者不认为自己属于法定盲。研究期间，14位参与者使用了屏幕放大镜，10 人调整了浏览器缩放级别，3 人使用双指缩放，5 人使用全屏颜色滤镜，3 人使用颜色主题（例如高对比度主题），5 人使用自定义指针。辅助技术使用情况的详细列表见附录 A.4。每场访谈约持续 90 分钟（$M = 91.7, SD = 21.9$），参与者获得了 30 美元的报酬。本研究已获得所在机构 IRB 的批准。研究开始前，参与者均已充分了解研究目的和数据使用方式，并提供了知情同意。

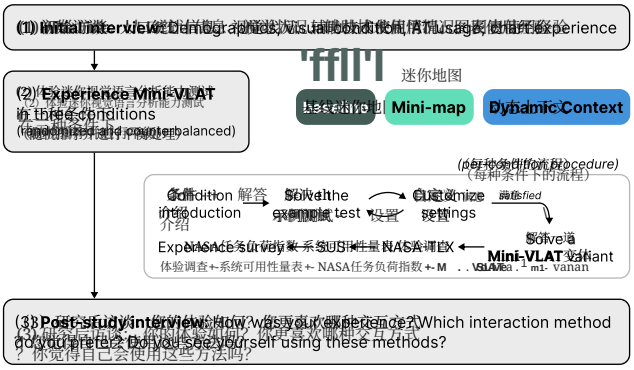


图 6：研究流程概述。参与者反复查看示例问题并调整设置，直至满意为止。

5.2 材料

与形成性研究（§3）一样，我们使用 Mini-VLAT [70] 来评估原型交互方法在 12 种常见图表类型上的表现。对于这项包含三个条件（基线、迷你地图和动态上下文）的被试内评估，我们在原始版本的 Mini-VLAT 图表-问题集（$v0$）基础上，新增了两种变体（$v1$ 和 $v2$）。这些变体主要通过两种方式引入：修改图表数据（置换、添加噪声或调整幅度）以及修改问题（定位或主题）。两位可视化专家对所有变体进行了多轮审阅，并根据他们的反馈作出调整。在整个过程中，我们优先确保每个问题图表对的语义得以保留，并维持难度相近（附录 B）。我们还为每种条件下的教程额外生成了三组问题图表对（饼图、折线图、堆叠条形图）。这些示例问题基于 mtcars 数据集生成（附录 A.5）。我们未收集参与者针对这些示例问题的测量数据，并且所有条件使用相同的一组示例问题。

5.3 流程

本研究分为三个部分：初始访谈、体验三种条件下的 Mini-VLAT，以及研究后访谈（图 6）。我们首先说明了研究流程以及收集的数据。获得知情同意后，我们进行了初始访谈，收集参与者的人口统计信息、视觉状况、辅助技术的使用情况，以及他们对图表的熟悉程度（自我报告）。完整的问题列表见附录 A.2。我们介绍了研究设备的界面，随后进入各项条件。条件顺序采用拉丁方方法进行平衡，并在参与者之间随机分配（附录 A.1）。Mini-VLAT 的不同版本经过分配，确保每个版本在每种条件下都恰好出现两次，从而实现全面覆盖。

在每种条件开始时，我们介绍了相关的交互方式，并指导参与者体验示例测试。该测试通过三个问题模拟 Mini-VLAT。完成示例测试后，参与者进入自定义页面。在此页面上，我们说明了可用的设置，并解答了参与者的疑问。参与者可以更改任意

表 3：参与者人口统计。A/G：年龄和性别。CVD：色觉缺陷（低对比度 = 低对比度、光敏感= 光敏感）。O：发病（A=后天性、C=先天性）。LB：被认定为法定盲。MS：显示器尺寸。CF：图表熟悉度。诊断：ROP（早产儿视网膜病变）、RP（视网膜色素变性）、PDR（增殖性糖尿病视网膜病变）。性别：M（男性）、F（女性）、NB（非二元性别）、AG（无性别）。如有数据，视力/视野分别标示左眼（L）和右眼（R）。† 表示参与过形成性研究。

PID	A/G	确诊病症	视力	视野	O	CVD	LB	MS	CF
P1	49/NB	双侧视神经病变	右眼:20/400，左眼:20/250	10°，中心视力丧失	A	低对比度	**T**	27"	5
P2	43/AG	ROP	右眼:无，左眼:20/500	周边视野缺损	C	—	**T**	27"	3
P3	66/M	视神经病变	20/1000	完整	C	低对比度	**T**	27"	3
P4	28/M	无虹膜症、畏光	右眼：20/120，左眼：20/200	完整	C	—	**T**	32"	3
P5	35/M	白化病、眼球震颤、近视	20/200	完整	C	光敏感	**T**	15"	5
P6	39/F	增殖性糖尿病视网膜病变，复视	右眼：20/50，左眼：20/200	周边视野缺损	A	—	F	19"	4
P7	41/M	ROP	右眼：无光感，左眼：5/400	10°	C	低对比度	**T**	48"	5
P8	59/F	视神经／日光性神经病变	20/200	完整	A	—	**T**	24"	5
P9	60/F	青光眼、散光	20/30	右眼:5°，左眼:手动	A	—	**T**	15"	5
P10	29/M	视网膜色素变性、畏光	未知	< 10°	C	低对比度	**T**	27"	4
P11	29/M	蓝锥单色视	右眼:20/200, 左眼:20/350	中心视力丧失	C	Yes	**T**	16"	4
P12	25/F	白化病，眼球震颤	20/40	完整	C	—	F	27"	4
P13	52/M	垂体肿瘤	未知	右眼:10°, 左眼:2°	A	—	**T**	22"	5
P14	23/F	脑肿瘤	未知	受限（60°）	A	—	**T**	31"	4
P15	66/M	锥杆细胞营养不良	20/600	受限（120°）	A	Yes	**T**	24"	4
P16	30/M	RP	20/100	受限（120°）	C	Yes	F	32"	4
P17	63/M	白内障	右眼：20/400，左眼：无光感	完整	C	—	F	17"	2
P18†	32/M	双眼幼年型青光眼、白内障	右眼：20/200，左眼：无光感	周边视野缺损	C	—	**T**	32"	5
P19	28/M	眼球震颤	右眼：20/150，左眼：20/125	完整	C	红绿	**T**	15"	5
P20†	28/F	斜视、Chiari畸形	右眼：20/250，左眼：20/320	受限（65°）	C	低对比度	**T**	23"	5
P21	43/F	视网膜疾病、白内障	20/400	周边视野缺损	A	低对比度	**T**	24"	4
P22†	42/F	白化病、眼球震颤、散光	未知	完整	C	光敏感	**T**	27"	5

设置，同时配置页面上的示例图表会实时更新。除了查看示例图表，参与者还可以在配置页面和示例测试之间来回切换，以确认所选配置。参与者满意后，即可开始完成指定的 Mini-VLAT 变体。

对于示例和 Mini-VLAT 变体，我们遵循了针对教育环境中低视力人士的实践 [48]，并将时间限制设为原始时间限制的 150% [70],，因此每道题的时间限制为 38 秒。我们要求参与者避免随机猜测，不确定时跳过题目。超过时间限制后，系统会显示提示，要求他们进入下一题。完成测试后，参与者填写了三组主观评价问卷：任务工作负荷（基于 NASA 任务负荷指数 [38]）、系统可用性量表（SUS） [15], 以及基于体验的问题。所有问卷均采用五点李克特量表。每种条件结束后，参与者休息两分钟，以尽量减轻眼疲劳和疲劳，这一做法遵循了先前研究的建议 [83]。完成全部三种条件后，我们以半结构化访谈作结，邀请参与者回顾他们的体验。研究后访谈的完整问题列表见附录 A.3。

5.4 测量与数据分析

*5.4.1 交互数据。*我们分析了参与者在所有条件下通过指针移动与图表进行交互的情况。指针位置以 30 Hz 的采样率记录。每个样本表示为

一个元组（x，y，t），其中 x和 y分别是归一化后的水平位置和垂直位置，t是时间戳。基于这些数据，我们（1）将图表交互的轨迹和密度可视化；（2）针对每个图表比较不同条件下的轨迹。为了比较轨迹，我们将每条轨迹重新采样为 500 步，使用动态时间规整 [80],计算成对距离，并通过 999 次置换执行 PERMANOVA [5]，以检验条件效应。对于结果显著的图表，我们进行了事后两两 PERMANOVA 检验，并采用 Holm 校正 [40] 进行多重比较。

*5.4.2 测试表现。*我们使用两项指标评估参与者在所有测试和条件下的表现：(1) 测试得分，以及 (2)测试时长，即测试总时间。为计算各条件下的测试得分，我们遵循标准评分指南 [70]：答对得 +1 分，超时/跳过得 0 分，答错得 $-1/N_{\text{op}}$ 分，其中 N_{op} 为答案选项的数量。为计算测试时间并避免网络连接缓慢造成的影响，我们将所有问题的作答时间（最多计至超时）相加。

为考虑参与者视觉状况的差异，我们采用混合效应分析。被试内因素**条件**包含三个级别（基线、迷你地图、动态上下文）；为验证平衡化，我们纳入了被试间因素**顺序**。我们使用 Shapiro–Wilk检验评估正态性。对于呈正态分布的测量指标，我们拟合了线性混合效应模型

（LME），进行了方差分析 [51], 并开展了 Tukey诚实显著差异检验事后比较。对于非正态分布的测量指标，我们采用对齐秩变换方差分析 [101]，并使用对齐秩变换对比 [29],，同时进行 Tukey诚实显著差异检验校正。效应量以偏η平方（η_p^2）报告，其中 0.01、0.06 和 0.14 分别表示小、中、大效应 [22]。

5.4.3 主观指标。 我们使用三份问卷评估参与者的体验：（1）基于 NASA任务负荷指数 的任务负荷问卷 [38]，（2）用于评估可用性的 SUS，以及（3）受先前研究启发的体验相关问题 [10, 83]。所有问题均采用 5 点李克特量表：任务负荷的回答范围从非常低（*1*）到非常高（*5*），而 SUS 和体验相关问题的回答范围从非常不同意（*1*） 到非常同意（*5*）。任务负荷和体验相关问题逐项分析，而 SUS 的回答则先汇总为 SUS 得分，再进行分析。分析流程遵循上一节所述的方法。

5.4.4 定性数据。 在定性分析中，我们使用了参与者的视频、音频和屏幕录制。两位参与者（P2、P4）无法使用网络摄像头，另有一位参与者（P6）因技术问题未能录制视频。所有访谈场次均在本地录制，并使用 OpenAI Whisper [75] 转录。第一作者对照录音录像审阅了每份转录稿，并手动修正了转录错误。与第 3 节一样，我们多次观看所有录制内容，并记录参与者的身体动作模式、获取策略和辅助技术使用情况。我们采用反思性主题分析 [14]，着重呈现第一作者作为低视力人士的视角。编码和初步主题构建由第一作者主导；第一作者还撰写反思备忘录，记录其立场性和解释性决策。按照 Nowell等人 [68], 的做法，我们与合著者举行会议，为批判性讨论和完善诠释提供机会。

5.5 结果

5.5.1 测试效率与准确性（研究问题*1*）。在得分、完成时间和超时问题数量方面，各条件之间均无统计学上的显著差异。为完整起见，我们报告描述性统计数据。参与者在基线条件下的平均得分为 7.39（$SD = 2.14$），在迷你地图条件下为 6.52（$SD = 2.74$），在动态上下文条件下为 6.23（$SD = 2.77$）。基线条件下的平均完成时间为 253.08 秒（$SD = 50.43$），迷你地图条件下为 291.72 秒（$SD = 63.88$），动态上下文条件下为 287.58 秒（$SD = 67.80$）。基线条件下的平均超时次数为 0.95（$SD = 1.21$），迷你地图条件下为 1.64（$SD = 2.01$），动态上下文条件下为 1.59（$SD = 1.92$）。更多详情请见表4。

5.5.2 对辅助技术使用情况的影响（*RQ2*）。在所有条件下，参与者都使用了多种辅助技术（见附录 A.4）。在大多数情况下，迷你地图和动态上下文都能与辅助技术成功结合使用；然而，情况并非总是如此。对于这两种交互方式，最常见的整合挑战与**颜色滤镜和主题**有关。在网页浏览器中，使用高对比度主题时，许多颜色设置会被主题覆盖。例如，P21 无法使用外围变暗功能，也无法修改任何颜色。同样，在使用颜色反转滤镜时，外围变暗功能反而会使周围环境变亮，而不是使其变暗，迫使参与者对光敏感的参与者将其禁用。在颜色模式之间切换的参与者发现，某些配置有时在一种模式下有效，但在另一种模式下无效（例如 P5、P10、P11）。

并非所有**放大方法**都能与动态上下文和迷你地图顺畅配合。参与者使用了各种放大方法，包括全屏、镜片、基于浏览器的缩放调整以及捏合缩放。一些屏幕放大镜用户难以调整叠加区域（OA），原因是放大倍率过高（P3），或是他们使用的放大镜只允许指针在放大区域内移动（例如 P7、P8、P19），导致动态上下文和迷你地图所显示的上下文在显示屏边缘附近被裁切。对于使用捏合缩放的用户，由于叠加区域无法根据捏合缩放的变化动态调整，技术限制导致动态上下文和迷你地图的尺寸都不一致。

几位参与者（P1、P2、P5、P6）原以为动态上下文会取代他们使用的放大辅助技术，从而简化交互。正如 P1 所说，“如果这个工具能提供放大镜选项，比如点状放大镜，那就好了，因为我发现浏览器放大会应用于所有内容，而计算机放大镜有时放得太大，也会让导航变得非常繁琐。”最后，这种预期使一些参与者（例如 P9）觉得动态上下文中的内容比实际更小，尽管比例保持不变。

5.5.3 图表阅读策略（*RQ3*）。与§3中一样，大多数参与者采用了结构化方法。由于每张图表都与一道题目配对，时，他们通常会先阅读问题，然后查看图表，因此活动集中在问题旁边的右上区域（图8）。在基线条件下，参与者通常会先移至某个坐标轴，确定相关数值，再垂直移动到感兴趣区域，随后移至另一个坐标轴读取对应数值。若有图例，他们通常会先查看图例，再查看坐标轴。为了追踪和比较数值，参与者还使用了平移以外的方法。他们会进行水平/垂直滚动（如 P2、P6、P9、P12、P13、P21），用手指辅助（如 P14、P19），甚至将相关区域对齐到显示屏的垂直/水平边缘（如 P3、P12）。滚动可以实现稳定且更易控制的平移；使用手指或显示屏边缘则能提供清晰的视觉锚点。

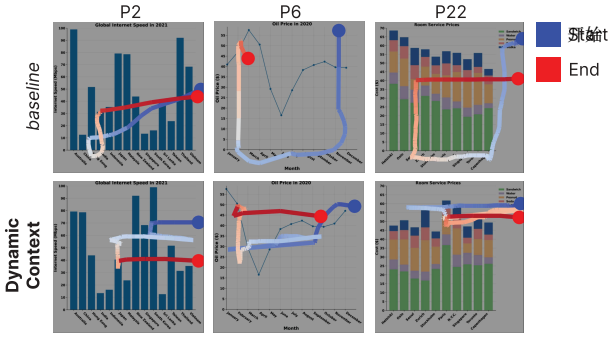


图7：通过时间对齐扫描路径可视化，对比 P2、P6 和 P22 在基线与动态上下文条件下的图表访问示例。

表4：所有测试问题 Q1-Q12 在各条件（基线、迷你地图、动态上下文）下各类结果（✓=正确、✗=错误、TO=超时、SK=跳过）的回答统计。

QID	图表	基线				迷你地图				动态上下文			
		✓	✗	TO	SK	✓	✗	TO	SK	✓	✗	TO	SK
Q1	树状图	100.0%	0%	0%	0%	81.8%	9.1%	9.1%	0%	95.5%	0%	4.5%	0%
Q2	100% 堆叠条形图	95.5%	4.5%	0%	0%	86.4%	4.5%	4.5%	4.5%	77.3%	18.2%	4.5%	0%
Q3	直方图	86.4%	9.1%	4.5%	0%	59.1%	27.3%	13.6%	0%	77.3%	9.1%	13.6%	0%
Q4	分级统计图	72.7%	4.5%	13.6%	9.1%	59.1%	9.1%	22.7%	9.1%	59.1%	9.1%	13.6%	18.2%
Q5	Pie	68.2%	31.8%	0%	0%	63.6%	31.8%	4.5%	0%	54.5%	40.9%	4.5%	0%
Q6	气泡	63.6%	22.7%	4.5%	9.1%	50.0%	31.8%	13.6%	4.5%	45.5%	40.9%	13.6%	0%
Q7	堆叠条形图	4.5%	45.5%	22.7%	27.3%	18.2%	27.3%	40.9%	13.6%	4.5%	36.4%	45.5%	13.6%
Q8	Line	77.3%	18.2%	4.5%	0%	72.7%	18.2%	9.1%	0%	68.2%	22.7%	9.1%	0%
Q9	Bar	95.5%	4.5%	0%	0%	81.8%	13.6%	4.5%	0%	95.5%	4.5%	0%	0%
Q10	Area	63.6%	27.3%	9.1%	0%	72.7%	22.7%	4.5%	0%	54.5%	36.4%	9.1%	0%
Q11	堆叠面积图	27.3%	22.7%	27.3%	22.7%	27.3%	36.4%	22.7%	13.6%	13.6%	40.9%	31.8%	13.6%
Q12	散点图	54.5%	18.2%	9.1%	18.2%	59.1%	9.1%	13.6%	18.2%	68.2%	13.6%	9.1%	9.1%

使用动态上下文（聚焦+上下文）。动态上下文影响了参与者的访问策略。多位参与者（如 P2、P6、P12、P13、P18、P22）在使用动态上下文时调整了自己的方法（图7）。使用动态上下文时，他们会向图表中心平移，利用投影坐标轴定位相关数值，并据此调整移动轨迹。到达感兴趣区域后，他们会将视线转向另一个坐标轴，读取所需数值，并以十字准线作为视觉锚点。这一策略使指针交互集中在图表中心附近（图8）。即使使用动态上下文，一些参与者仍会不自觉地继续向某个坐标轴平移（P5、P6、P19）。在这些情况下，投影坐标轴仍为他们带来帮助，使他们可以有效跳过第二阶段的平移。一些参与者在测试过程中调整了策略（如 P5、P6、P13）。P6 评论道：“一开始我注意到自己会像往常一样移向坐标轴，但后来我意识到其实不需要。”P19 解释说：“最开始的几个问题里，我主要是在确认，即使放大后，比例是否仍然一致。”类似地，P5 在动态上下文视图中注意到了图例，并

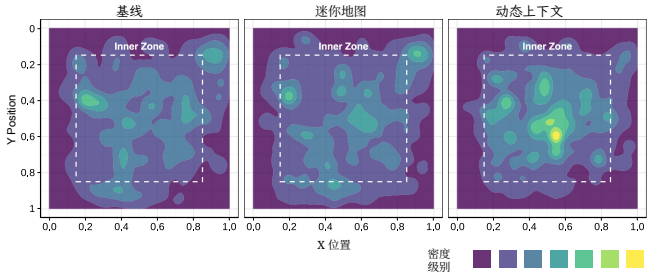


图8：不同条件下指针移动的密度。与基线和迷你地图相比，使用动态上下文时，指针活动似乎更集中。内侧区域标示了水平和垂直方向上各自居中的 70% 范围，数据很可能位于其中。

提到，“我喜欢那个关键点，我发现它也显示出来了。我当时在设置它的位置，让它靠近一些，这样我就可以尝试比较颜色。”对于某些图表，显示的上下文过窄。对于面积图（Q10），X轴显示了连续两年的四月、七月和十月；然而，并非所有参与者都能完整看到这两年的数据。

PERMANOVA显示，在多种图表中，与基线和迷你地图相比，动态上下文下的交互模式存在统计显著差异（图9）。对于**Q11（v0；堆叠面积图）**，动态上下文与基线（$F = 2.83, p = 0.036$）和迷你地图（$F = 3.47, p = 0.006$）存在差异；对于**Q7（v2；堆叠条形图）**，与基线（$F = 5.37, p = 0.030$）存在差异；对于**Q3（v0；直方图）**，与迷你地图（$F = 4.47, p = 0.030$）存在差异；对于**Q10（v0；面积图）**，与迷你地图（$F = 3.27, p = 0.048$）存在差异。在Q3（图9.a）、Q10（图9.c）和Q11（图9.d）中，动态上下文减少了平移操作；在Q11中，用户访问图例区域的次数也更少。这与观察结果一致：更便捷地获取上下文信息可以减少对平移的依赖，使图表阅读体验“更加紧凑”（P8）。P6评论道：“我真的、真的、真的很喜欢这样一点：你可以

把细节移近，同时还能用十字准线准确标出数据所在的位置，这太棒了。”相反，Q7（图9.b）显示，与基线相比，动态上下文下的平移操作有所增加。由于Q7是最具挑战性的图表之一（表4），动态上下文带来的额外访问便利促使用户进行更多交互并反复尝试解题。

参与者将十字准线用作视觉锚点，以追踪和比较数据，并表示十字准线增强了他们的信心。P2 解释道：“我真的很喜欢十字准线。在我试图确定某个数值的确切大小时，它是非常有用的指引。因为在没有任何指引或帮助的情况下操作时，我会用鼠标光标来模拟这种效果。我觉得，如果能再用十字准线做一次，就会像这样：啪、啪、啪。”对一些参与者而言，十字准线与 OA 结合使用起到了稳定作用（P9、P10、P12、P13）。P9 表示：“它能帮我集中注意力，这样我就能确保自己的视线不会游移，也不会凭空补全实际上并不存在的信息。”少数参与者（P12、P19）使用十字准线比较和估算比例，例如在饼图或堆叠面积图中。在饼图中，参与者将

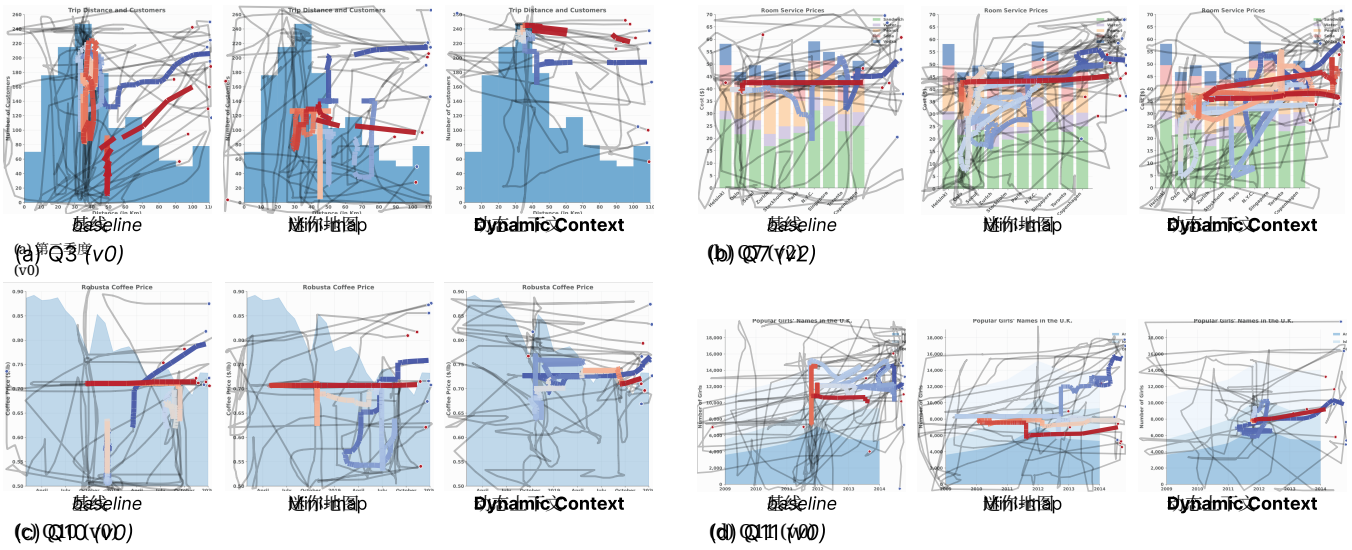


图9：不同条件之间显著轨迹差异的对比。各条个体轨迹以半透明方式呈现，平均轨迹则以高亮显示。

指针放在饼图中心，以便比较各扇区的比例与十字准线划分出的四个象限。

由于动态上下文采用紧凑的图表表示方式，有些人觉得这个视图"有点杂乱，让人觉得不直观，也更难阅读"（P1）。P5也表达了这种矛盾："所以这个框在某种意义上确实有帮助，因为它把内容带到你面前，但由于它是新东西，而且会让屏幕上更杂乱，因此也可能让人觉得有些难以应对或难以适应。"对于有复视的参与者（例如 P6、P11、P21）来说，跟上内容更具挑战性。P6提到："有时确实会让人有点应接不暇，尤其是我有复视，不过它还是值得的，因为这样我就可以回到"他们的常规工作流程。参与者建议按需启用动态上下文（例如 P5、P8、P10）、为投影元素添加边框（P6）、切换各个元素的可见性（P3、P6）、调暗其他内容（P5），甚至从图表中移除重复内容（P1），以应对这一挑战。正如 P4 总结的那样："这很棘手，因为我视野里的东西可能太多，太杂乱，让我不知所措。但关键在于平衡，而这在某种程度上因人而异。"

使用迷你地图（概览+细节）。参与者会使用图表的缩略视图来寻找下一个兴趣点，或获取全局上下文以进行定位。P4 评论道："由于放大，我更多地用它来确定自己在图表中的位置，但我的放大级别并不算很高。"其他参与者觉得它在视觉信息稀疏的区域很有用；P5 解释道："如果我放大到一个没有绘图线的位置，而且确实没有任何参照，我就不知道绘图线是在上方还是下方。"同样，P18 解释道："有一两次，它立即就很有帮助，提供了上下文。*[关于气泡图，]*我寻找看起来最靠左的数据点。然后我放大查看名称。接着瞥一眼迷你地图，就能看到，没错，这是最靠左的点。"

与动态上下文类似，一些参与者使用迷你地图的叠加区域来追踪和比较数值（§4）。例如，P6 和 P9 扩大并缩小该区域，将其当作尺子使用。P9 指出，"我用那个边框来对齐事物。"然而，大多数参与者认为，迷你地图在他们现有的策略中作用有限。大多数屏幕放大镜用户会先缩小视图或后退几步，以定位感兴趣区域，然后再放大以检查细节；因此，迷你地图提供的方向定位支持往往显得多余。P3 解释说，"因为我放大的是一个已知位置，所以我不需要知道我的点在哪里。我用 *Zoom* 已经很久了，这就是我的方法，所以我觉得小地图没带来任何好处。"

迷你地图通过采用紧凑布局和自定义设置，为低视力人士调整了概览+细节视图，但一些参与者仍觉得它不够易用（例如 P3、P6、P9、P14、P22）。P6 解释道："它不适合我，因为实在太小了 *[.....]* 有一次，我能看出其中一个 *[柱状图]* 更高，但它太小了，根本派不上用场。"尽管参与者承认迷你地图在其他情境中可能有用，但它对这项任务并无帮助。P9 提到，"如果我在办公室的办公桌前，我有一台电视，但我在那个屏幕上会迷失方向，"这可能是迷你地图能派上用场的情境。因此，迷你地图并未对参与者的策略做出显著贡献或产生明显影响。

5.5.4 可用性与工作负荷（研究问题*4*）。我们的原型交互方法可用性更高，并降低了总体努力程度。与其他条件相比，参与者认为动态上下文在图表阅读任务中的可用性显著更高。动态上下文的系统可用性量表得分最高（$M = 76.36$, $SD = 17.62$），高于迷你地图（$M = 61.82$, $SD = 22.20$）和基线（$M = 52.39$, $SD = 20.89$）。统计分析显示，条件对系统可用性量表得分有显著影响（线性混合效应模型：$F(2, 32) = 9.264$, $p < .001$, $\eta_p^2 = 0.367$）；事后比较表明，动态上下文的得分显著高于基线（$p < .001$）。总体而言，大多数参与者表示更喜欢使用动态上下文；P11 和 P17 更喜欢使用迷你地图；而 P7 和 P8 两种方式都不喜欢。

任务负荷评估显示，努力程度和体力需求均有显著改善（图10）。条件对努力程度有显著影响（线性混合效应模型：$F(2, 32) = 4.239, p = 0.023, \eta_p^2 = 0.209$）；事后比较表明，基线所需的努力程度高于动态上下文（$p = 0.027$）。同样，条件对体力需求也有显著影响（线性混合效应模型：$F(2, 32) = 3.606, p = 0.039, \eta_p^2 = 0.184$）；与动态上下文相比，基线的体力需求更高（$p = 0.030$）。定性反馈印证了这些发现。参与者指出，使用基线时需要做很多不必要的动作。例如，P2 解释道，“我比其他时候移动得多，因为我必须不停地转动头部，努力跟上自己看到的事物。”P7 也表达了类似的感受，“这有点困难。我得在屏幕上来回移动。”

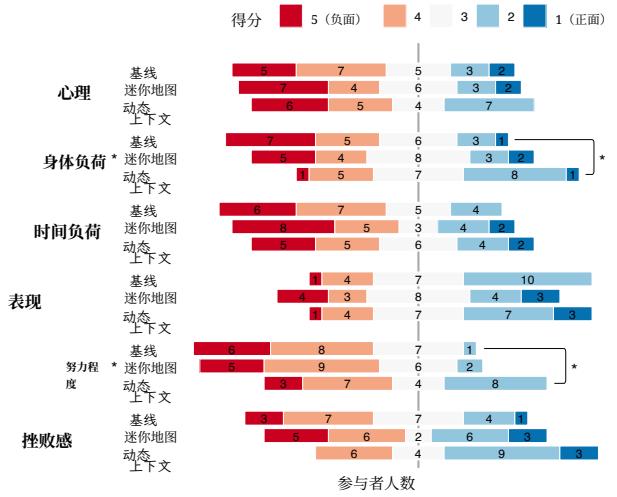


图10：任务负荷评估结果。星号（*）表示差异具有统计显著性（$p < 0.05$）。

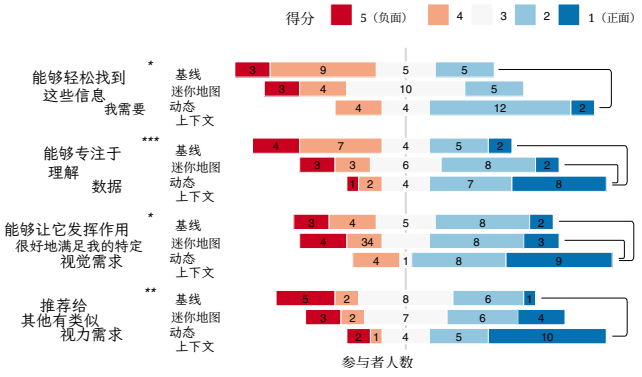


图11：体验评估结果。星号表示具有统计显著性： $^{*}p < 0.05$, $^{**}p < 0.01$, $^{***}p < 0.001$。

5.5.5 图表访问（研究问题*5*）。我们评估了不同条件下的四项访问感知指标。参与者在所有尺寸上对动态上下文的评分都显著高于基线，在部分尺寸上也高于迷你地图（图11）。参与者认为动态上下文最能帮助他们与自己的数据进行交互。

条件对专注于数据的能力有显著影响（线性混合效应模型：$F(2, 32) = 7.505, p = 0.002\ \eta_p^2 = 0.319$），动态上下文比基线更有助于集中注意力（$p = 0.002$）。对图表信息的访问感知也有类似结果（线性混合效应模型：$F(2, 32) = 10.029, p < .001, \eta_p^2 = 0.385$），动态上下文优于基线（$p < .001$）和迷你地图（$p = 0.009$）。参与者还表示，动态上下文与自身需求的契合度更高。我们发现，符合参与者需求（线性混合效应模型：$F(2, 32) = 5.196, p = 0.011, \eta_p^2 = 0.245$）和推荐意愿程度（线性混合效应模型：$F\ 2, 32 = 6.093$），$p = 0.006\ \eta_p^2 = 0.276$）均存在显著效应。在个人适配度方面，参与者更偏好动态上下文，而非基线（$p = 0.016$）或迷你地图（$p = 0.036$）；在推荐意愿方面，参与者推荐动态上下文的可能性显著高于基线（$p = 0.004$）。

参与者反馈表明，动态上下文提升了他们的信心和自主感。尤其是十字准线，因其在复杂视觉任务中的准确性而受到认可。P3解释道：“十字准线让我更能掌控情况，因此更有信心；如果时间充足，我也更有可能答对。”对一些参与者来说，使用动态上下文带来了视觉自主感。P6指出：“这个工具会促使你真正自己完成任务，而不是直接告诉你答案。从某种意义上说，它给出了答案，就像明眼人能看到线条、不需要帮助，因此知道答案一样。”同样，P2回忆道：“那一刻我就想，‘哦，明眼人做数学时体验到的就是这种感觉吗？’*[...]* 我觉得它让我得以一窥明眼人的体验，因为信息就在眼前。我不用再拼命地指望自己能找到它。”P10甚至认为，动态上下文可能对所有人都有帮助，并表示：“我觉得这类工具对其他人也有帮助，甚至对没有视障的人也有帮助。”

尽管动态上下文和迷你地图提供了上下文，仍有一些上下文无法获取，例如可用信息本身的范围。用户难以确定某个答案或特定数据元素是确实存在但当前被遮挡，还是根本不存在于图表中（即“你不知道自己不知道什么” [9]）。例如，在使用动态上下文时，P5 评论道：“对于一些问题，我想知道图表中是否确实包含相关信息。”这种难以确定可见范围的情况也导致了困惑：当饼图中的百分比不可见时，P3 感到困惑。此外，还有少数参与者（例如 P7、P8、P11）对这两种交互原型的信任度有限。P8 解释道：“我还在努力弄清楚它的工作方式，以及它究竟在做什么。不知为什么，我总觉得不太信任它。我喜欢自己寻找答案。”

6 讨论

在上一节（§5）中，我们评估了所提出的交互方法在使用 12 种类型图表进行图表问答任务时的表现。本节将回顾我们的结果（§5.5），并将其归纳为三个主题，作为面向未来系统的设计见解（DI）；这类系统旨在为低视力人士提供视觉上下文。随后，我们将讨论如何将我们的方法扩展到包含更高层次的上下文（例如趋势），以及如何将其应用于图表以外的其他领域。最后，我们将回顾本研究，并讨论其局限性和未来工作的方向。

6.1 为低视力人士提供上下文的设计洞见

动态上下文显著有助于阅读图表（§5.5）。尽管完成时间和得分未能体现这一点，但主观评估、定性反馈和我们的观察结果都支持这一发现。相比之下，迷你地图的概览+细节方式虽然优于基线，但不如动态上下文实用，且在此任务中提供的访问能力较弱——这与先前的研究结果一致 [42]。使用动态上下文完成 Mini-VLAT 所需的努力程度显著降低，参与者的访问感也显著增强。例如，参与者更多地与图表数据进行交互，而较少导航至坐标轴或图例。然而，目前动态上下文和迷你地图的原型实现并非始终兼容现有辅助技术的使用；动态上下文的设计增加了参与者的视觉过载；许多参与者还认为迷你地图太小且难以访问。尽管如此，我们的结果表明，为低视力人士提供视觉上下文的系统具有积极效果。

根据研究发现，我们提炼出三个新兴主题，并将其作为设计洞见（DI），以指导未来系统的开发，为低视力人士提供视觉上下文访问。尽管这些洞见源于低视力人士的需求，但提升可视化对他们的无障碍程度，最终也能惠及所有人 [60, 100]。

6.1.1 提供视觉上下文可提升视觉访问（*DI1*）。我们提出的两个交互原型都使用视觉元素来传达上下文，例如在指针周围显示坐标轴。我们通过十字准线这一视觉锚点，支持用户访问空间上下文，以追踪和比较数据（例如网格线）。十字准线功能让用户在追踪或比较数据值时拥有更多控制权。例如，参与者使用它将十字准线对准饼图中心、条形顶部，或估算折线图上某个点的确切数值。图例始终置于右上方；除了了解数据类别的上下文外，参与者还用它在连续色阶（例如分级统计图）等复杂情境中比较颜色；然而，它无法帮助应对其他形式的色觉缺陷。对低视力人士而言，视觉访问（相较于非视觉访问）是实现无障碍体验不可或缺的一环 [89]。借助无障碍的视觉上下文，低视力人士可以模拟“明眼人的体验”（P2）。当前的辅助技术无法提供与明眼人体验相当的工作流程 [109]；然而，低视力人士和明眼人理解图表时，依循的视觉直觉大致相同 [87]。在现有辅助技术中加入动态上下文，不仅能让用户访问视觉上下文，还能为阅读图表增添其他工作流程。

6.1.2 降低视觉复杂度是实现视觉访问的必要条件（*DI2*）。动态上下文和迷你地图面临的一个核心挑战是视觉复杂度。在动态上下文中，我们将上下文叠加到指针周围的紧凑区域内。这导致界面中的图表元素重复，信息密度较高，对有复视的参与者（例如 P6、P20）或使用高倍放大的参与者（例如 400% 或更高倍率，如 P3）尤其不利。限制显示的上下文内容可以改善这一点。例如，可以为元素添加边框 [27], , 切换单个元素的可见性，甚至从图表中移除原始内容。迷你地图显示的是图表的缩小副本；然而，它并不易于访问。要有效地传达空间上下文，

作为辅助工具，迷你地图应减少细节。在开创性研究中，Treisman 和 Gelade [92] 展示了我们对视觉内容最即时的感知是视觉特征（例如颜色、形状、纹理）。为了理解所见内容，我们会将这些特征组合成具有含义的元素。对于低视力人士而言，视觉感知能力受限，因而能注意到的特征范围也较窄。例如，低视力人士几乎不可能注意到演示视频中的指针 [83]。因此，通过概览 [42] 呈现的空间上下文应生成图表的抽象表示。例如，对于条形图，这可以意味着移除文本元素、加大条形之间的间距，并标示标题和图例的大致位置。

6.1.3 支持变化的用户需求（*DI3*）。用户需求不仅限于其视觉状况，还包括：“他们当前的目标是什么？”、“他们现在正在查看什么内容？”以及“他们正在使用什么辅助技术配置？”例如，用户的信息目标可能各不相同，比如找出最高值或解读数据中的趋势；他们可能会更改放大级别，或查看不同的图表。上下文或其呈现方式应适应这些变化的需求。在我们的研究中，对于问题询问两个坐标轴之间关系的散点图，动态上下文并未带来明显益处。在某些情况下，动态上下文的视觉呈现让参与者感到困惑，他们以为这些详细信息与问题有关。相比之下，使用迷你地图时，参与者可以查看坐标轴，同时在视野中看到概览。参与者使用了各种辅助技术（附录 A.4），并在研究期间根据当下需求对其进行调整 [66]。例如，他们会提高缩放级别以读取坐标轴数值，降低缩放级别以寻找下一个兴趣点，或通过切换反色来更改显示颜色。然而，我们的原型并未考虑这些变化。P5 切换反色时，外围变暗区域变成了白色；P3 更改放大级别时，叠加区域中的上下文则被裁切。在他们的研究中，Wobbrock 等人 [102] 提出了基于能力的设计。基于能力的设计系统能够内在地感知用户能力，并根据用户的功能特征优化界面。可适配系统将调整的负担从用户转移到软件上。例如，这包括根据放大级别更改概览区域尺寸、根据系统级颜色变化更改元素颜色，或根据所使用的辅助技术提供不同的默认配置。尽管个性化是核心的实现目标（与其他重要的低视力人士研究 [（例如 79, 83, 106]）一致），自动根据用户的情境需求调整设置，是让低视力人士能够访问上下文的自然下一步。

6.2 高层次上下文和其他领域

在本研究中，我们通过概览提供低层次视觉上下文（例如坐标轴、图例、网格线）和空间上下文。然而，我们并未涉及更高层次的上下文，例如数据中的趋势或关系。以往研究使用人工智能对话代理处理这类高层次上下文 [35, 49, 84], , 通过音频描述或对话提供相关信息。然而，由于存在人工智能幻觉的风险，这些方法会引发用户的信任顾虑 [103]。此外，这些方案主要面向非视觉访问而设计，与我们的研究结果形成对比；我们的结果表明，

支持低视力用户的视觉自主性和导航至关重要。未来的工作可以利用低层次图表上下文的视觉增强，为人工智能生成的高层次上下文提供依据 [52, 83]。例如，当检测到条形图中存在上升趋势时，可以用一种醒目的颜色突出显示属于该趋势的条形顶部，并用一系列箭头将其连接起来。

虽然我们的目标是提升低视力人士的图表可访问性，但我们提出的交互方法也可应用于其他领域，例如日常计算机使用。举例来说，虽然已有研究探索了适用于网页或图表的迷你地图式方法 [16], , 动态上下文也可以通过纳入页面结构信息并提供视觉上下文，进一步提升网页导航体验；这可以建立在现有的面向低视力人士的网页视觉导航方法之上 [, 例如 10]。此外，迷你地图还可以提供当前所在位置以外的空间上下文。与针对屏幕阅读器用户的研究类似 [12, 109], , 空间上下文涉及层级信息，也涉及当前视图内及其周围是否存在视觉元素。例如，成功的无障碍设计不应只告知低视力人士当前显示了什么，还必须传达预期元素或上下文缺失的信息 [9]。

6.3 局限性与未来工作

我们的研究存在若干局限性。首先，我们观察到了一种学习效应，该效应受到参与者对测试图表结构熟悉程度的影响。由于不同 Mini-VLAT 变体的图表结构相似，这种效应在研究过程中逐渐增强（附录 B）。这同时缩短了响应时间，并减少了他们进行指针交互的次数。我们采用了平衡顺序的方法来减轻这一影响；不过，后续研究可以考虑在不同条件下使用完全不同的图表，或采用被试间设计。此外，22 名参与者在解决任务时采用的工作流程大相径庭，因此我们的定量结果并不一致。我们优先考虑外部效度，因此没有限制参与者选择的工具或访问方式。未来研究可以招募更多参与者，并进行分层分析，以更好地区分这些不同工作流程和视觉能力的影响；不过，这是一项颇具挑战性的工作 [59]。

我们没有与先前的工作进行直接比较 [3, 73]。作出这一决定是为了尽量减少对低视力人士参与者的不利影响，例如疲劳和眼疲劳；在涉及这一群体的研究中，这些都是至关重要的风险 [83]。此外，由于研究范围存在根本差异，这类比较难以实施：现有方法要么并非为堆叠面积图等复杂图表类型而设计 [73]，要么并未聚焦于图表上下文 [3]。最后，用户需要投入认知负荷来“改掉”既有工作流程，这必然会影响他们与新工具的初次交互，因此也使有意义的比较变得复杂。在研究过程中，几位参与者最初沿用了原有策略，后来才意识到我们的原型所提供的图表访问能力。要评估动态上下文和迷你地图的长期效果，需要开展纵向研究，以观察使用是否产生持久影响，尤其是表现是否趋于稳定，以及用户策略是否因此发生变化。这类研究应将这两种方法的使用情况与其他已实现的解决方案进行比较。

7 结论

图表仍广泛用于呈现信息，但阅读图表是一项具有多层复杂性的视觉任务。现有的无障碍方法主要依赖非视觉方式（例如音频），但它们往往限制用户自主探索数据的视觉自主性，尽管低视力人士更倾向于运用视觉。在一项包含五位低视力人士参与者的形成性研究中，我们确定了对图表阅读至关重要的四种上下文要素：坐标轴、图例、网格线和概览。为探究如何更好地让用户访问这些要素，我们比较了两种交互方法：动态上下文和迷你地图。两者都以紧凑布局呈现上下文，随指针移动，并旨在配合现有辅助技术使用。在一项针对=22 位低视力人士的评估中，与基线相比，动态上下文显著减轻了身体负荷，并提升了参与者感知到的图表访问能力。相较之下，迷你地图通过提供空间上下文帮助用户定位。然而，动态上下文中的视觉元素造成了信息过载，而迷你地图中的图像又太小，难以辨认。我们将研究发现归纳为设计见解，主张：（1）最大限度地提升对上下文的视觉访问；（2）通过抽象降低复杂性；（3）适应低视力人士不断变化的需求。这些理念也可能适用于图表或网页等其他复杂视觉内容。总体而言，上下文叠加层能够改善图表访问，同时保留用户的控制权，指向一种支持而非取代视觉交互的工具发展方向。

开放科学

所有代码和数据均已公开。访问项目网站 https://visual-context.github.io/ 了解更多信息。

致谢

我们衷心感谢匿名评审者提出的真知灼见，也感谢所有参与者，他们的贡献丰富了这项研究。我们感谢 Chu Li、Lozus Zhang 和 Lucy Jiang 提出的宝贵意见与支持。Yotam Sechayk 获得了日本文部科学省（MEXT）文部科学省奖学金的资助。Mark Colley 获得了佳能研究奖学金的资助。本研究得到了东京大学人工智能与超越研究所的支持。本研究还部分获得了日本科学技术振兴机构（JST）“面向创新研究生态系统的可持续伙伴关系”（ASPIRE）项目的资助，资助编号为 JPMJAP2401。

参考文献

[1] Yuki Abe、Keisuke Matsushima、Kotaro Hara、Daisuke Sakamoto 和 Tetsuo Ono。2025。《我可以在夜间跑步！》：利用增强现实支持低视力跑者夜间有向导陪跑。载于*2025*年计算机系统中的人为因素*CHI*会议论文集（*CHI '25*）。计算机协会，美国纽约州纽约市，1 20 10 1145 3706598 3714284 –。[2] doi：。/。B. Agarwal 和 W. Stuerzlinger。。2013。《WidgetLens：一种用于自适应放大组件内容的系统》。载于第*27*届*BCS*国际人机交互大会论文集（*BCS-HCI '13*）。BCS Learning & Development Ltd.，英国斯温登，1–10。[3] Rubén Alcaraz-Martínez、Mireia Ribera、Adrià Adeva-Fillol 和 Afra Pascual-Almenara。2024。提升低视力人士的统计图表可访问性：用户测试的见解。信息社会中的普遍访问 24, 4 2024 2981 3019 10 1007 10209 024 01111（五月），–。doi：。/s - - - 4 [4] Rubén AlcarazMartínez、MireiaRibera Turró 和 Toni Granollers Saltiveri。2022。面向低视力人士和色觉缺陷人士的统计图表可访问性启发式评估方法

。信息社会中的普遍访问

21, 4 2022 863 894 10 1007 10209 021 00816 0（十一月），–。[5] doi: 。/s - - - Marti J Anderson。。《一种用于非参数多变量方差分析的新方法》。*Austral ecology* 2001 26, 1（2001），32–46。[6] Caroline Appert、Olivier Chapuis 和 Emmanuel Pietriga。2010。高精度放大镜。载于*SIGCHI* 人机交互系统中的人为因素会议论文集（*CHI '10*）。计算机协会，美国纽约州纽约市， 273 282 10 1145 1753326 1753366 –。doi: 。/。[7] 苹果公司。无日期。更改 Mac 上的辅助功能缩放设置。 h t t p s:// support.apple.com/guide/mac-help/change-zoom-settings-for-accessibility-mh40579/mac。[8] Patrick Baudisch、Nathaniel Good、Victoria Bellotti 和 Pamela Schraedley。2002。保持情境关联：对焦点加上下文屏幕、概览和缩放的比较评估。载于*SIGCHI* 人机交互系统中的人为因素会议论文集（*CHI '02*）。计算机协会，美国纽约州纽约市， 259 266 10 1145 503376 503423 –。doi: 。/。[9] Jeffrey P. Bigham。2014。《利用机会式无障碍改进，让网络内容更易于查看》。载于第*27*届*ACM*用户界面软件与技术研讨会论文集（*UIST '14*）。计算机协会，美国纽约州纽约市， 117 122 10 1145 2642918 2647357 –。doi: 。/。[10] Syed Masum Billah、Vikas Ashok、Donald E. Porter 和 I.V. Ramakrishnan。2018。SteeringWheel：一种用于低视力网络浏览的保持局部性的放大界面。载于*2018*年计算机系统中的人为因素*CHI*会议论文集（*CHI '18*）。计算机协会，美国纽约州纽约市， 1 13 10 1145 3173574 3173594 –。doi: 。/。[11] Theerapong Binali、Ching-Hwa Chang、Yen-Jung Chang 和 Hsin-Yi Chang。2024。高中生和大学生在数据可视化的科学与日常情境中的图表解读能力。*Science & Education* 33, 3（2024），763–785。[12] Matthew Blanco、Jonathan Zong 和 Arvind Satyanarayan。2022。Olli：一种支持屏幕阅读器无障碍的可扩展可视化库。载于*IEEE VIS*海报。IEEE。[13] Rupert Bourne、Jaimie D Steinmetz、Seth Flaxman、Paul Svitil Briant、Hugh R Taylor、Serge Resnikoff、Robert James Casson、Amir Abdoli、Eman Abu-Gharbieh、Ashkan Afshin、Hamid Ahmadieh、Yonas Akalu、Alehegn Aderaw Alamneh、Wondu Alemayehu、Ahmed Samir Alfaar、Vahid Alipour、Etsay Woldu Anbesu、Sofia Androudi、Jalal Arabloo、Aries Arditi、Malke Asaad、Eleni Bagli、Atif Amin Baig、Till Winfried Bärnighausen、Maurizio Battaglia Parodi、Akshaya Srikanth Bhagavathula、Nikha Bhardwaj、Pankaj Bhardwaj、Krittika Bhattacharyya、Ali Bijani、Mukharram Bikbov、Michele Bottone、Tasanee Braith waite、Alain M Bron、Zahid A Butt、Ching-Yu Cheng、Dinh-Toi Chu、Maria Vittoria Cicinelli、João M Coelho、Baye Dagnew、Xiaochen Dai、Reza Dana、Lalit Dandona、Rakhi Dandona、Monte A Del Monte、Jenny P Deva、Daniel Diaz、Shirin Djalalinia、Laura E Dreer、Joshua R Ehrlich、Leon B Ellwein、Mohammad Hassan Emamian、Arthur G Fernandes、Florian Fischer、David S Friedman、João M Furtado、Abhay Motiramji Gaidhane、Shilpa Gaidhane、Gus Gazzard、Berhe Gebremichael、Ronnie George、Ahmad Ghashghaee、Mahaveer Golechha、Samer Hamidi、Billy Randall Hammond、Mary Elizabeth R Hartnett、Risky Kusuma Hartono、Simon I Hay、Golnaz Heidari、Hung Chak Ho、Chi Linh Hoang、Mowafa Househ、Segun Emmanuel Ibitoye、Irena M Ilic、Milena D Ilic、April D Ingram、Seyed Sina Naghibi Irvani、Ravi Prakash Jha、Rim Kahloun、Himal Kandel、Ayele Semachew Kasa、John H Kempen、Maryam Keramati、Moncef Khairallah、Ejaz Ahmad Khan、Rohit C Khanna、Mahalaqua Nazli Khatib、Judy E Kim、Yun Jin Kim、Sezer Kisa、Adnan Kisa、Ai Koyanagi、Om P Kur mi、Van Charles Lansingh、Janet L Leasher、Nicolas Leveziel、Hans Limburg、Marek Majdan、Navid Manafi、Kaweh Mansouri、Colm McAlinden、Seyed Farzad Mohammadi、Abdollah Mohammadian-Hafshejani、Reza Mohammadpourhodki、Ali H Mokdad、Delaram Moosavi、Alan R Morse、Mehdi Naderi、Kovin S Naidoo、Vinay Nangia、Cuong Tat Nguyen、Huong Lan Thi Nguyen、Kolawole Ogundimu、Andrew T Olagunju、Samuel M Ostroff、Songhomitra Panda-Jonas、Konrad Pesudovs、Tunde Peto、Zahiruddin Quazi Syed、Mohammad Hifz Ur Rahman、Pradeep Y Ramulu、Salman Rawaf、David Laith Rawaf、Nickolas Reinig、Alan L Robin、Luca Rossetti、Sare Safi、Amirhossein Sahebkar、Abdallah M Samy、Deepak Saxena、Janet B Serle、Masood Ali Shaikh、Tueng T Shen、Kenji Shibuya、Jae Il Shin、Juan Carlos Silva、Alexander Silvester、Jasvinder A Singh、Deepika Singhal、Rita S Sitorus、Eirini Skiadaresi、Vegard Skirbekk、Amin Soheili、Raúl A R C Sousa、Emma Elizabeth Spurlock、Dwight Stambolian、Biruk Wogayehu Taddele、Eyayou Girma Tadesse、Nina Tahhan、Md Ismail Tareque、Fotis Topouzis、Bach Xuan Tran、Ravensara S Travillian、Miltiadis K Tsilimbaris、Rohit Varma、Gianni Virgili、Ya Xing Wang、Ningli Wang、Sheila K West、Tien Y Wong、Zoubida Zaidi、Kaleab Alemayehu Zewdie、Jost B Jonas 和 Theo Vos。2021。30年来失明和远视力及近视力损伤患病率的趋势：全球疾病负担研究分析。*The Lancet Global HEALTH* 9, 2（2021年2月），e 130 143 10 1016 2214 109 20 30425 3 –e。doi: 。/s - x( ) - Virginia Braun 和 Victoria Clarke。2019。《反思反思性主题分析》。*Qualitative Research in Sport, Exercise and Health* 11, 4（2019年8月），589–597。doi:10.1080/2159676X.2019.1628806

[15] Jon Pincus。1996年。《SUI：可用性评估而不使用》。载于*CHI*可用性研讨会。[16] Stefano Burigat、Luca Chittaro 和 Edoardo Parlato。2008。移动设备上的地图、图表和网页导航：带概览的可缩放用户界面的有效性。载于第10届国际移动设备与服务人机交互会议论文集（MobileHCI '08）。计算机协会，美国纽约州纽约市，147–156。doi:10.1145/1409240.1409257[17] M. S. T. Carpendale 和 Catherine Montagnese。2001。统一演示空间的框架。载于第14届年度ACM用户界面软件与技术研讨会论文集（UIST '01）。计算机协会，美国纽约州纽约市， 61 70 10 1145 502348 502358 –。doi: . / 。[18] Arnavi Chheda-Kothary、David A Rios、Kynnedy Simone Smith、Avery Reyna、Cecilia Zhang 和 Brian A. Smith。2023。了解盲人和低视力用户对桌面屏幕阅读器中空间交互的态度。载于第25届ACM SIGACCESS国际计算机与无障碍会议论文集（Assets '23）。计算机协会，美国纽约州纽约市，文章 83, 5 10 1145 3597638 3614490 页。doi: . / 。[19] Jinho Choi、Sanghun Jung、Deok Gun Park、Jaegul Choo 和 Niklas Elmqvist。2019。面向非视觉的可视化：让视障人士能够使用可视化。《计算机图形论坛》 38, 3 2019 249 260 10 1111 13686 ( ), – 。doi: . /cgf。[20] Pramod Chundury、Yasmin Reyazuddin、J. Bern Jordan、J onathan Lazar 和 Niklas Elmqvist。2024。TactualPlot：利用触觉感觉替代将数据空间化，以实现触摸屏无障碍。IEEE可视化与计算机图形学汇刊 30，1（2024年1月），836–846。doi:10.1109/TVCG.2023. 3326937[21] Andy Cockburn、Amy Karlson 和 Benjamin B. Bederson。2009。概览+细节、缩放和焦点+上下文界面综述。《ACM计算调查》 41, 1 2009 2 1 2 31 10 1145 1456650 1456652 （1月），：–：。doi: . / 。[22] Jacob Cohen。2013。《行为科学统计功效分析》。Routledge。[23] Michael D. Crossland、Rui S. Silva 和 Antonio F. Macedo。2014。视力障碍人士对智能手机、平板电脑和电子阅读器的使用。《眼科与生理光学》34，5（2014），552–557。doi:10.1111/opo.12136[24] Yuan Cui、W Ge Lily、Yiren Ding、Fumeng Yang、Lane Harrison 和 Matthew Kay。2023。可视化素养的自适应评估。IEEE可视化与计算机图形学汇刊 30，1（2023），628–637。[25] Darkreader Ltd. 2014。Dark Reader：适用于所有网站的深色模式。网页浏览器扩展。https://darkreader.org/ 访问日期：2025-09-01。[26] Ewa Dzierzgowska、Michał Maćkowski、Mateusz Kawulok、Piotr Brzoza、Stella Maćkowska 和 Dominik Spinczyk。2025。面向低视力用户的数学图中结构信息呈现替代音频图形方法。《科学报告》15，1（2025年7月），21972。doi:10.1038/s41598- 025-07710-2[27] Frank Elavsky、Cynthia Bennett 和 Dominik Moritz。2022。我的可视化有多无障碍？使用 Chartability 评估可视化可访问性。《计算机图形论坛》 41, 3 2022 57 70 10 1111 14522 ( ), – 。doi: . / 2024 cgf。[28] Frank Elavsky、Lucas Nadolskis 和 Dominik Moritz。。Data Navigator：以无障碍为中心的数据导航工具包。IEEE可视化与计算机图形学汇刊 30，1（2024年1月），803–813。doi:10.1109/TVCG.2023. 3327393[29] Lisa A Elkin、Matthew Kay、James J Higgins 和 Jacob O Wobbrock。2021。用于多因素对比检验的对齐秩变换程序。载于UIST '21：第34届年度ACM用户界面软件与技术研讨会，线上会议，美国，2021年10月10日至14日。ACM，754–768。[30] Danyang Fan、Alexa Fay Siu、Hrishikesh Rao、Gene Sung-Ho Kim、Xavier Vazquez、Lucy Greco、Sile O'Modhrain 和 Sean Follmer。2023。网络数据可视化对屏幕阅读器用户的可访问性：COVID-19期间的实践与体验。《ACM无障碍计算汇刊》16，1（2023年3月），4:1–4:29。doi:10.1145/3557899[31] Leo Ferres、Gitte Lindgaard、Livia Sumegi 和 Bruce Tsuji。2013。评估一款改善图表与图形可访问性的工具。《ACM计算机与人机交互汇刊》 20, 5 2013 28 1 28 32 10 1145 2533682 2533683 （11月），：–：。doi: . / 。[32] Johannes Fuchs、Bastian Jäckl、Michael Jüttler、Daniel A Keim 和 Rita Sevast-janova。2024。Treeducation：用于教授树图布局算法的可视化教育平台。IEEE可视化与计算机图形学汇刊（2024）。[33] G. W. Furnas。1986。广义鱼眼视图。《SIGCHI简报》17，4（1986年4月），16–23。doi:10.1145/22339.22342[34] Michele Geronazzo、Alberto Bedin、Luca Brayda、Claudio Campus 和 Federico Avanzini。2016。用于虚拟地图非视觉探索的交互式空间声化。《国际人机研究杂志》85（2016年1月）， 4 15 10 1016 2015 08 004 – 。doi: . /j.ijhcs. . 。[35] Joshua Gorniak、Yoon Kim、Donglai Wei 和 Nam Wook Kim。2024。VizAbility：通过基于大语言模型的对话交互增强图表可访问性。载于第37届年度ACM用户界面软件与技术研讨会论文集（UIST '24）。计算机协会，美国纽约州纽约市，1–19。doi:10.1145/3654777.3676414

[36] Kanika Goswami、Puneet Mathur、Ryan Rossi 和 Franck Dernoncourt。2025。ChartCitor：用于细粒度图表视觉归因的多智能体框架。doi: 10 48550 2502 00989 2502 00989 [ ] . /arXiv. 。arXiv: 。cs Timo [37] Götzelmann。。LucentMaps：为盲人和视障人士设计的3D打印视听触觉地图。载于第18届ACM SIGACCESS国际计算机与无障碍会议论文集（ASSETS '16）。计算机协会，美国纽约州纽约市，81–90。doi:10.1145/2982142. 2982163[38] Sandra G. Hart 和 Lowell E. Staveland。1988。NASA任务负荷指数（NASA-TLX）的开发：实证与理论研究结果。载于《心理学进展》，Peter A. Hancock 和 Najmedin Meshkati（编）。《人类心理工作负荷》，第 52 139 183 10 1016 0166 4115 08 62386 9 卷。[39] North-Holland，– 。doi: . /S - ( ) - Maryam Hedayati 和 Matthew Kay。。大学生在可视化课程中学到了什么。IEEE可视化与计算机图形学汇刊（2024）。[40] Sture Holm。1979。一种简单的序贯拒绝式多重检验程序。《斯堪的纳维亚统计学杂志》（1979），65–70。[41] Tom Horak、Philip Berger、Heidrun Schumann、Raimund Dachselt 和 Christian Tominski。2021。响应式矩阵单元格：一种用于探索和编辑多变量图的焦点+上下文方法。IEEE可视化与计算机图形学汇刊 27, 2 2021 1644 1654 10 1109 2020 3030371 （2月），–[42] 。doi: . /TVCG. 。Kasper Hornbæk 、 Benjamin B. Bederson 和 Catherine Plaisant。。带有和不带概览的可缩放用户界面中的导航模式与可用性。《ACM计算机与人机交互汇刊》9，4（2002年12月），362–389。doi:10.1145/586081.586086 [43] Takeo Igarashi 和 Ken Hinckley。2000。用于浏览大型文档的速度相关自动缩放。载于第13届年度ACM用户界面软件与技术研讨会论文集——UIST '00。ACM出版社，美国加利福尼亚州圣迭戈，139 148 10 1145 354401 354435 – 。doi: . / 。[44] Junyong In 和 Sangseok Lee。。统计数据呈现。《韩国麻醉学杂志》 70, 3 2017 267 276 10 4097 2017 70 3 267 （5月），– 。[45] doi: . /kjae. . . 。Md Touhidul Islam 和 Syed Masum Billah。。SpaceX Mag：一种用于优化低视力用户智能手机应用界面的自动化、可扩展、快速空间压缩器。《ACM交互式、移动、可穿戴和泛在技术论文集》7，2，2023，59 1 59 36 10 1145（6月），：–: 。doi: . /[46] Yuyang Ji 和 Haohan Wang。。Socratic Chart：用于稳健SVG图表理解的多个智能体协作框架。doi:10.48550/arXiv.2504.09764 arXiv: 2504 09764 [ ] . cs Chloe Keilers、Garreth W. Tigwell 和 Roshan L. Peiris。2023。面向盲人和低视力受众的数据可视化可访问性。载于《人机交互中的普适访问》，Margherita Antona 和 Constantine Stephanidis（编）。Springer Nature Switzerland，Cham，399–413。doi:10.1007/978-3-031-35681- 0 26[48] Thomas Kellaghan 和 Vincent Greaney。2019。《公共考试考察》。世界银行出版社（ 2019 1 353 10 1596 978 1 4648 1418 1 ），– 。doi: . / -[49] - - - Jiho Kim 、 Arjun Srinivasan 、 Nam Wook Kim 和 Yea-Seul Kim。。为盲人和低视力用户探索图表问答。载于2023年CHI计算系统人因大会论文集（CHI '23）。计算机协会，美国纽约州纽约市，1–15。doi:10.1145/ 3544548.3581532[50] N. W. Kim、S. C. Joyner、A. Riegelhuth 和 Y. Kim。2021。无障碍可视化：设计空间、机遇与挑战。《计算机图形论坛》40，3（ 2021 173 188 10 1111 14298 ），–。doi: . /cgf。Alexandra Kuznetsova 、[51] Per B Brockhoff 和 Rune HB Christensen。2017。lmerTest软件包：线性混合效应模型中的检验。《统计软件杂志》82（2017），1–26。[52] Florian Lang 和 Tonja Machulla。2021。按下看不见的按钮：通过增强现实评估辅助低视力人士的视觉设计。载于第27届ACM虚拟现实软件与技术研讨会论文集（VRST '21）。计算机协会，美国纽约州纽约市，1 10 10 1145 3489849 3489873 – 。doi: . / 。Florian Lang、Verena [53] Pues、Albrecht Schmidt 和 Tonja-Katrin Machulla。2023。BrailleBuddy：一种支持视力障碍儿童学习盲文的有形用户界面。载于2023年CHI计算系统人因大会论文集（CHI '23）。计算机协会，美国纽约州纽约市，1 14 10 1145 3544548 3580844 – 。doi: . / 。Hae-Na Lee、[54] Vikas Ashok 和 Iv Ramakrishnan。。拉近事物：增强低视力用户在办公生产力应用中的交互体验。《ACM人机交互论文集》5，EICS（2021年5月），197:1–197:18。doi:10.1145/3457144[55] Hae-Na Lee、Sami Uddin 和 Vikas Ashok。2020。TableView：为屏幕放大器用户提供高效访问网络数据记录的途径。载于第22届ACM SIGACCESS国际计算机与无障碍会议论文集（ASSETS '20）。计算机协会，美国纽约州纽约市，1–12。doi:10.1145/3373625.3417030[56] Sukwon Lee、Sung-Hee Kim、Ya-Hsin Hung、Heidi Lam、Youn-ah Kang 和 Ji Soo Yi。2015。人们如何理解陌生的可视化？新手的信息可视化意义建构扎根模型。IEEE 可视化与计算机图形学汇刊22, 1 (2015), 499–508. [57] Sukwon Lee、Sung-Hee Kim 和 Bum Chul Kwon。2017。VLAT：可视化素养评估测试的开发。*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊23, 1 2017 551 560 10 1109 2016 ( ), – . doi: . /TVCG. . [58] Sukwon Lee、Bum Chul Kwon、Jiming Yang、Byung Cheol Lee 和 Sung-Hee Kim。2019。用户认知特征与可视化素养之间的相关性。应用科学9, 3 (2019), 488. [59] Kelly Mack、Emma McDonnell、Dhruv Jain、Lucy Lu Wang、Jon E. Froehlich 和 Leah Findlater。2021。我们所说的"无障碍研究"究竟指什么？：1994至2019年CHI和ASSETS无障碍论文文献综述。载于*2021*年*CHI*人机交互系统中的人为因素会议论文集。ACM，日本横滨，1–18。doi:10.1145/3411764.3445412[60] Kim Marriott、Bongshin Lee、Matthew Butler、Ed Cutrell、Kirsten Ellis、Cagatay Goncu、Marti Hearst、Kathleen McCoy 和 Danielle Albers Szafir。2021。面向残障人士的包容性数据可视化：行动倡议。*Interactions* 28, 3 2021 47 51 10 1145 (四月), – . doi: . / [61] [ ] 微软。无日期。使用放大镜，让屏幕上的内容更容易看清。https://support.microsoft.com/en-us/windows/use-magnifier-to-make-things-on-the-screen-easier-to-see-414948ba-8b1c-d3bd-8615-0e5e32204198. [62] Rezylle Milallos、Tae Tom Oh 和 Roshan L. Peiris。2024。探索电触觉反馈在面向盲人和视障用户的数据可视化中的有效性。载于人机交互中的普适访问——第*18*届国际会议，*UAHCI 2024*，作为第*26*届人机交互国际会议（*HCII 2024*）的一部分举行，美国华盛顿特区，*2024*年*6*月*29*日至*7*月*4*日，会议论文集，第三部分（计算机科学讲义，第*14698*卷），Margherita Antona 和 Constan-tine Stephanidis（编）。施普林格，413–428。doi:10.1007/978-3-031-60884-1_28[63] Eric Mörth、Zona Kostic、Nils Gehlenborg、Hanspeter Pfister、Johanna Beyer 和 Carolina Nobre。2025。超越时间与准确性：视觉问题解决策略。载于*2025*年*CHI*人机交互系统中的人为因素会议论文集。1–22。[64] Omar Moured、Morris Baumgarten-Egemole、Karin Müller、Alina Roitberg、Thorsten Schwarz 和 Rainer Stiefelhagen。2024。Chart4Blind：用于图表无障碍转换的智能界面。载于第*29*届国际智能用户界面会议论文集（*IUI '24*）。计算机协会，美国纽约州纽约市，504 514 10 1145 3640543 3645175 – 。doi: . / .[65] Azadeh Nazemi。方法：为视力障碍人士提供视觉组件无障碍访问。《人机交互最新趋势国际期刊》4, 1 (四月 2013), 54–69。[66] Alan F. Newell。1995。非凡的人机交互。载于《非凡的人机交互：残障用户界面》。剑桥大学出版社，美国，3–18。[67] Carolina Nobre、Kehang Zhu、Eric Mörth、Hanspeter Pfister 和 Johanna Beyer。2024。读懂像素之间的信息：探究可视化素养的障碍。载于*2024*年*CHI*人机交互系统中的人为因素会议论文集。1–17。[68] Lorelli S. Nowell、Jill M. Norris、Deborah E. White 和 Nancy J. Moules。2017。主题分析：努力满足可信度标准。《国际定性方法期刊》16, 1 (2017年12月), 1609406917733847。doi:10.1177/1609406917733847[69] Oleh Omelchenko、Oleksandra Konopatska、Pavlo Khomenko 和 Tymofii Kharin。2025。Mini-VLAT的跨语言与文化适配：乌克兰语可视化素养评估研究。*Eurovis 2025*——短文(2025 10 2312 20251079)。doi: . /EVS。Saugat Pandey 和 [70] Alvitta Ottley。Mini-VLAT：一种简短而有效的可视化素养测量工具。《计算机图形论坛》42, 3 (2023), 1–11。doi:10.1111/CGF.14809[71] Joel Persinger、Steven Follmer 和 Magdy Akladios。2025。盲文显示器使用不适原因的探索性研究。《设计中的人体工程学》(2025年11月 2025 10648046251393543 10 1177 10648046251393543),。doi: . / [72] Emmanuel Pietriga 和 Caroline Appert。Sigma镜片：融合空间、时间与半透明效果的焦点—上下文转换。载于*SIGCHI*人机交互系统中的人为因素会议论文集（*CHI '08*）。计算机协会，美国纽约州纽约市，1343–1352。doi:10.1145/1357054.1357264[73] Yash Prakash、Pathan Aseef Khan、Akshay Kolgar Nayak、Sampath Jayarathna、Hae-Na Lee 和 Vikas Ashok。2025。提升智能手机数据图表低视力可用性的探索。*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊31, 1 (2025年1月), 853–863。doi:10.1109/TVCG.2024.3456348[74] Yash Prakash、Akshay Kolgar Nayak、Sampath Jayarathna、Hae Na Lee 和 Vikas Ashok。2024。理解低视力人群对条形图的图形感知。载于第*26*届*ACM SIGACCESS*国际计算机与无障碍会议，*ASSETS 2024*，加拿大纽芬兰与拉布拉多省圣约翰斯，*2024*年*10*月*27*日至*30*日，David R. Flatla、Faustina Hwang、Tiago João Vieira Guerreiro 和 Robin Brewer（编）。ACM，加拿大纽芬兰与拉布拉多省圣约翰斯，59:1–59:10。doi:10.1145/3663548.3675616[75] Alec Radford、Jong Wook Kim、Tao Xu、Greg Brockman、Christine McLeavey 和 Ilya Sutskever。2022。通过大规模弱监督实现稳健语音识别。arXiv:2212.04356 [eess.AS] https://arxiv.org/abs/2212.04356

[76] Max Rädler、Mark Colley 和 Enrico Rukzio。2025。VIP-Sim：一种以用户为中心的视觉障碍模拟方法，旨在实现无障碍设计。载于第*38*届*ACM*用户界面软件与技术研讨会年会论文集（*UIST '25*）。计算机协会，美国纽约州纽约市，文章 47, 20 10 1145 3746059 3747704 页。doi：. / . React。React——用于构建用户界面的JavaScript库。https: //react.dev/ 访问日期：2025-01-19。[78] Samuel Reinders、Matthew Butler、Ingrid Zukerman、Bongshin Lee、Lizhen Qu 和 Kim Marriott。2025。可刷新触觉显示器与对话代理相遇：通过触摸与语音探究无障碍数据呈现与分析。*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊31, 1 (2025年1月 2025 864 874 10 1109 2024 3456358 2408 04806 [ ]), –。doi：. /TVCG. . arXiv：. cs Andreas Sackl 、 Franziska Graf 、 Raimund Schatz 和 Manfred Tscheligi。2020。确保无障碍访问：面向低视力用户的视频播放个性化增强。载于第*22*届*ACM SIGACCESS*国际计算机与无障碍会议。ACM，线上会议希腊， 1 4 10 1145 3373625 3417997 –。doi：. / . Hiroaki Sakoe 和 Seibi Chiba。2003。动态规划算法在口语词识别中的优化。*IEEE* 声学、语音与信号处理汇刊26, 1 (2003), 43–49。[81] Manojit Sarkar 和 Marc H. Brown。1992。图表的图形鱼眼视图。载于*SIGCHI*人机交互系统中的人为因素会议论文集（*CHI '92*）。计算机协会，美国纽约州纽约市，83–91。doi:10.1145/142750.142763 [82] Ingrid U Scott、William J Feuer 和 Julie A Jacko。2002。图形用户界面屏幕特征对年龄相关性黄斑变性患者计算机任务准确性和速度的影响。《美国眼科学杂志》 134, 6 2002 857 862 10 1016 0002 9394 02 01795 6 (十二月), –。doi：. /S - ( ) - Yotam Sechayk 、 Ariel Shamir 、 Amy Pavel 和 Takeo Igarashi。VeasyGuide：在演示视频中针对讲师操作为低视力学习者提供个性化视觉引导。doi: 10 1145 3663547 3746372 2507 21837 [ ] . / . arXiv：. cs JooYoung Seo、Sanchita S. Kamath、Aziz Zeidieh、Saairam Venkatesh 和 Sean McCurry。2024。MAIDR与AI相遇：探索由盲人和低视力用户参与、面向他们的多模态大语言模型数据可视化解读。载于第*26*届*ACM SIGACCESS*国际计算机与无障碍会议论文集（*ASSETS '24*）。计算机协会，美国纽约州纽约市，1–31。doi:10.1145/3663548.3675660[85] JooYoung Seo、Yilin Xia、Bongshin Lee、Sean Mccurry 和 Yu Jun Yam。2024。MAIDR：利用多模态数据表示实现统计可视化的无障碍访问。载于*2024*年*CHI*人机交互系统中的人为因素会议论文集（*CHI '24*）。计算机协会，美国纽约州纽约市， 1 22 10 1145 3613904 3642730 –。doi：. / . Ariel Shamir 和 Alla Stolpnik。用于探索多变量图的交互式视觉查询。《计算机与图形学》36, 4 (2012年6月), 257–264。doi:10. 1016 2012 02 006 / j.cag. . . Ben Shneiderman。视觉要义：信息可视化的任务与数据类型分类法。载于*1996*年*IEEE*可视语言研讨会论文集（*VL '96*）。IEEE计算机学会，美国，336。[88] Anurag Kumar Singh 和 Anirudha Joshi。2023。Grapho：让视障人士也能访问折线图。载于第*13*届印度人机交互会议论文集（*IndiaHCI '22*）。计算机协会，美国纽约州纽约市， 20 29 10 1145 3570211 3570213 –。doi：. / . Sarit Felicia Anais Szpiro、Shafeka Hashash、Yuhang Zhao 和 Shiri Azenkot。2016。低视力人士如何使用计算设备：了解挑战与机遇。载于第*18*届*ACM SIGACCESS*国际计算机与无障碍会议论文集（*ASSETS '16*）。计算机协会，美国纽约州纽约市，171–180。doi:10.1145/2982142. 2982168[90] Desney S. Tan、Brian Meyers 和 Mary Czerwinski。2004。WinCuts：操控任意窗口区域，以更有效地利用屏幕空间。载于*CHI '04*人机交互系统中的人为因素会议扩展摘要。计算机协会，美国纽约州纽约市，1525–1528。doi:10.1145/985921.986106[91] Mary Frances Theofanos 和 Janice (Ginny) Redish。2005。帮助低视力用户及其他用户使用符合其需求的网站：一个网站适用于所有人是否可行？《技术传播》52, 1 (2005年2月), 9–20。[92] Anne M. Treisman 和 Garry Gelade。1980。注意的特征整合理论。《认知心理学》12, 1 (1980年1月), 97–136。doi:10.1016/0010- 0285 80 90005 5 ( ) - W C. . HTML5 图像描述扩展（ longdesc ）。https://www.w3.org/TR/html-longdesc/。访问日期：2025-09-07。[94] W3C。2020。无障碍富互联网应用（WAI-ARIA）图形模块。https://www.w3.org/TR/graphics-aria-1.0/。访问日期：2025-09-07。[95] W3C网页无障碍倡议（WAI）。2018。网页内容无障碍指南（WCAG）2.1。https://www.w3.org/TR/WCAG21/。访问日期：2025-09-07。[96] Ru Wang、Zach Potter、Yun Ho、Daniel Killough、Linxiu Zeng、Sanbrita Mondal 和 Yuhang Zhao。2024。GazePrompt：通过注视感知增强提升低视力人士的阅读体验。载于*CHI*人机交互系统中的人为因素会议论文集，*CHI 2024*，美国夏威夷州檀香山，五月 *2024*年*11*月*11*日至*16*日（*Chi '24*）。ACM，美国纽约州纽约市，文章894，第894:1–894:17页。doi:10.1145/3613904.3642878[97] Ru Wang、Linxiu Zeng、Xinyong Zhang、Sanbrita Mondal和Yuhang Zhao。2023年。理解低视力人群如何阅读：眼动追踪研究。载于*2023*年*CHI*计算系统人因大会论文集。ACM，德国汉堡， 1 17 10 1145 3544548 3581213 –。doi: 。/ 。Yanan Wang、Yuhang Zhao和Yea-Seul Kim。 。低视力人士如何体验信息可视化？载于计算机系统中的人为因素*CHI*会议论文集，*CHI 2024*，美国夏威夷州檀香山，*2024*年*5*月*11*日至*16*日（*Chi '24*）。ACM，美国纽约州纽约市，文章43，第43:1–43:15页。doi:10.1145/3613904.3642188[99] 维基百科贡献者。2025年。所见即所得（你所见即你所得）。维基百科。https://en.wikipedia.org/wiki/WYSIWYG [100] Brianna Lynn Wimer、Laura South、Keke Wu、Danielle Albers Szafir、Michelle A. Borkin和Ronald A. Metoyer。2024年。超越视力障碍：重新界定无障碍数据表示的范围。*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊 30卷12期（2024年12月），7619–7636。doi:10.1109/TVCG.2024. 3356566[101] Jacob O Wobbrock、Leah Findlater、Darren Gergle和James J Higgins。2011年。仅使用方差分析程序进行非参数析因分析的对齐秩变换。载于计算机系统中的人为因素国际会议论文集，*CHI 2011*，加拿大不列颠哥伦比亚省温哥华，*2011*年*5*月*7*日至*12*日。ACM，143–146。[102] Jacob O. Wobbrock、Shaun K. Kane、Krzysztof Z. Gajos、Susumu Harada和Jon Froehlich。2011年。基于能力的设计：概念、原则与实例。*ACM*无障碍计算汇刊 3卷3期（2011年4月），9:1–9:27。doi:10.1145/1952383.1952384[103] Matthias Wölfel、Mehrnoush Barani Shirzad、Andreas Reich和Katharina Anderer。2024年。基于知识和生成式人工智能驱动的教学对话代理：格赖斯合作原则与信任的对比研究。大数据与认知计算 8卷1期（2024年），2。doi:10.3390/BDCC8010002[104] Yalong Yang、Maxime Cordeil、Johanna Beyer、Tim Dwyer、Kim Marriott和Hanspeter Pfister。2021年。沉浸式抽象数据可视化中的具身导航：对于三维散点图，概览+细节还是缩放更好？*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊 27卷2期（2021年2月），1214–1224。doi:10.1109/TVCG.2020.3030427[105] Yichun Zhao、Miguel A Nacenta、Mahadeo A. Sukhai和Sowmya Somanath。2024年。TADA：让盲人和低视力人群能够使用节点链接图。载于*2024*年*CHI*计算系统人因大会论文集（*CHI '24*）。计算机协会，美国纽约州纽约市，1–20。doi:10.1145/3613904.3642222[106] Yuhang Zhao、Sarit Szpiro和Shiri Azenkot。2015年。ForeSee：面向低视力人士的可定制头戴式视觉增强系统。载于第*17*届*ACM SIGACCESS*计算机与无障碍国际会议论文集（*Assets '15*）。计算机协会，美国纽约州纽约市， 239 249 10 1145 2700648 2809865 –。doi: 。/ 。Yuhang Zhao、Sarit Szpiro、Jonathan Knighten和Shiri Azenkot。2016年。CueSee：探索帮助低视力人士完成视觉搜索任务的视觉线索。载于*2016*年*ACM*普适与泛在计算国际联合会议论文集（*UbiComp '16*）。计算机协会，美国纽约州纽约市， 73 84 10 1145 2971648 2971730 –。doi: 。/ 。Hanwen Zheng、Sijia Wang、Chris Thomas和Lifu Huang。2025年。通过稳健的图表组件识别提升图表问答能力。载于*IEEE/CVF*计算机视觉应用冬季会议，*WACV 2025*，美国亚利桑那州图森，*2025*年*2*月*26*日至*3*月*6*日。IEEE，5741–5750。doi:10.1109/wacv61041.2025.00560[109] Jonathan Zong、Crystal Lee、Alan Lundgard、JiWoong Jang、Daniel Hajas和Arvind Satyanarayan。2022年。丰富的屏幕阅读器体验，助力无障碍数据可视化。《计算机图形论坛》41卷3期（2022年），15–27。doi:10.1111/cgf. 14519

A 用户研究详情

我们补充介绍用户研究的流程和结果。

A.1 平衡表

表5：实验条件平衡化。每一行表示一个顺序索引对应的任务序列。测试变体（v0-v2）的分配方式为：每种条件下每个变体恰好出现两次，并且每个顺序序列均使用所有测试变体。

任务1	任务2	任务3
基线 (v0)	动态上下文 (v1)	迷你地图 (v2)
动态上下文 (v0)	迷你地图 (v1)	基线 (v2)
迷你地图 (v0)	基线 (v1)	动态上下文 (v2)
迷你地图 (v2)	动态上下文 (v1)	基线 (v0)
动态上下文 (v2)	基线 (v1)	迷你地图 (v0)
基线 (v2)	迷你地图 (v1)	动态上下文 (v0)

A.2 初始访谈问题

以下是用户研究 (§5) 初始访谈期间使用的问题。我们不在此列表中列出人口统计问题（例如年龄或性别认同）。

(1) 您的视力状况如何？是先天性还是后天性的？(2) 您可以告诉我们您的视力和视野范围吗？（可选）(3) 您是否被认定为法定盲？(4) 您使用计算机时会用到哪些辅助工具？(5) 您对图表有多熟悉？请从 1（非常不熟悉）到 5（非常熟悉）进行评分。(6) 您现在使用的是什么设备，其显示屏尺寸是多少？

A.3 研究后访谈问题

以下是用户研究（§5）结束时用于引导半结构化访谈的问题。为方便起见，在向参与者提问时，我们将动态上下文和迷你地图统称为“工具”。

(1) 您对今天使用的工具有什么印象？(2) 使用这些工具时是否遇到过什么具体挑战？(3) 有没有哪些图表是某个工具比另一个工具处理得更好的？(4) 总体而言，您更愿意使用哪种工具？(5) 您还有其他意见吗？

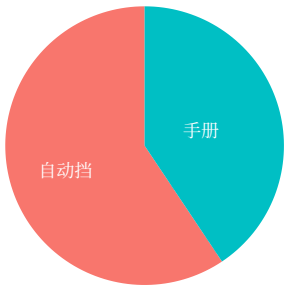
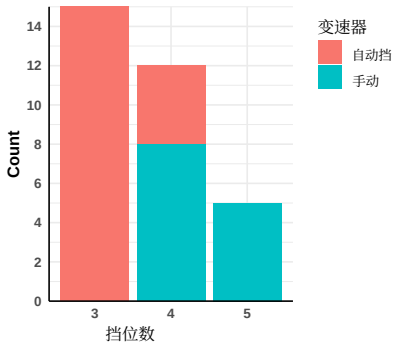
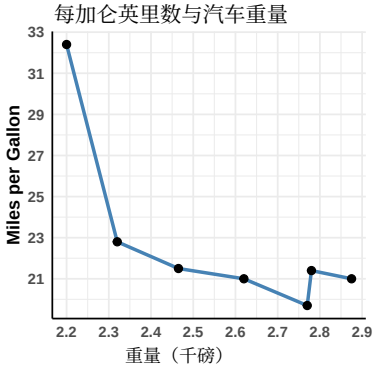
A.4 参与者使用辅助技术

表6：研究参与者报告的辅助技术使用情况。图例表示研究任务期间使用的辅助技术（•）与一般使用但研究期间未使用的辅助技术（○）。定义如下：内容缩放包括浏览器缩放、捏合缩放或指针下方文本放大；颜色滤镜包括全屏滤镜（例如反色）；颜色主题包括高对比度主题或深色模式扩展；自定义指针包括不同的颜色、大小或效果。表中未包含P3在问答环节中特别使用的读取指针下方文本，以及P20通常依赖的替代文本，后者无法用于研究图表。

PID	屏幕放大镜	内容 Zoom	颜色滤镜	颜色主题	自定义指针
P1	○	•	•		
P2		•		•	
P3	•				
P4	•			○	
P5	•		•	○	
P6	•	•		○	
P7	•	•			•
P8	•	○	○		
P9		•			
P10		○	•		
P11	•	○	•	○	
P12		•	○		
P13		•		○	
P14	•	•		○	•
P15	•				
P16	•				
P17	•				
P18	•			•	
P19		•		○	•
P20	•	•	○	○	•
P21		•	•	○	
P22	•	•	○	•	•

A.5 示例测试图表与问题

表7：示例测验中使用的问题，参与者通过这些问题熟悉工具和界面。每道题都附有答案选项和图表。正确答案已突出显示。

问题1	问题2	问题3
问： 手动变速的汽车较少，速箱。 **答：** , 错误	**问：** 有多少辆汽车有 5 个挡位? **A:** 5, 8, 10, 12	**问：** 哪种汽车重量（千磅）对应的每加仑英里数最低? **答：** , 2.2, 2.72, 2.52
变速器类型占比	按挡位数统计的汽车数量	每加仑英里数与汽车重量
		

B 原始 VLAT 材料与变体

在用户研究流程中，我们使用了可视化素养评估测试（VLAT） [57, 70], ，这是一项成熟的测试，要求参与者与图表进行交互并阅读图表。我们使用的测试基于 Mini-VLAT [70], ，它是 VLAT 的精简版本。原始 VLAT 包含 12 个可视化，每个可视化都配有多个问题；而 Mini-VLAT 中每个可视化仅有一个问题。先前研究表明，Mini-VLAT 虽然较短，但仍能有效评估可视化素养 [70]。因此，为避免视疲劳和疲劳（这对低视力人士而言很常见），我们在研究中选择了 Mini-VLAT。

为有效评估动态上下文和迷你地图，我们使用了 Mini-VLAT 问题集的 3 个变体：由我们尽可能忠实复现的原始版本，以及另外两个变体。先前研究曾使用 VLAT 的变体来应对文化或语言障碍，例如，Omelchenko 等人 [69] 针对不同文化改编测试，并比较了直接翻译与问题集变体。在本研究中，我们生成变体，以防止反应记忆，并鼓励参与者与每个新图表进行交互。生成每个变体时，我们优先确保问题和可视化集的语义得以保留。尽管我们承认，测试的变体可能会影响对可视化素养的准确评估，但本研究的目标并非准确评估可视化素养。表8展示了研究中一组可视化与问题的原始版本和替代变体示例。

B.1 变体生成

除了原始版本 Mini-VLAT 问题集外，我们还生成了两个额外的变体，并优先保留语义。在变体生成过程中，我们使用了五种修改技术：三种修改底层数据，两种修改问题。

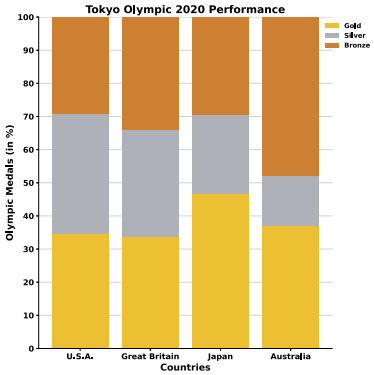
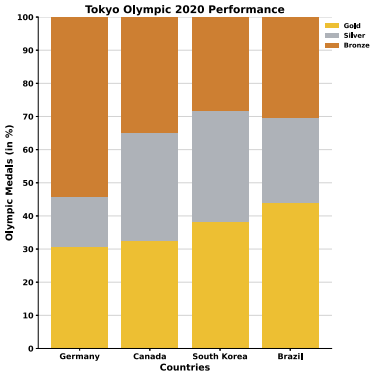
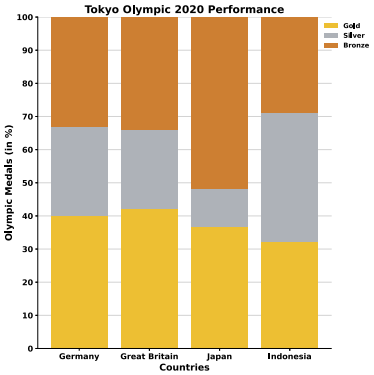
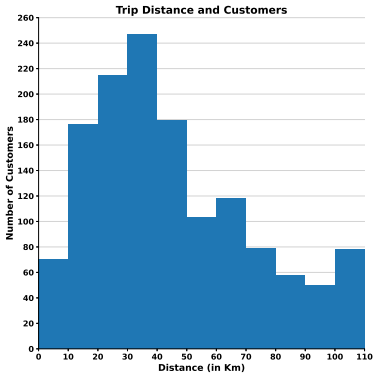
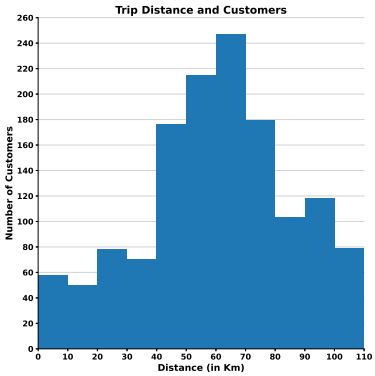
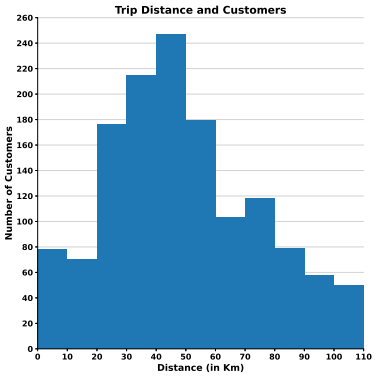
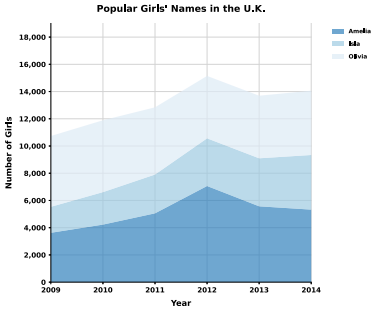
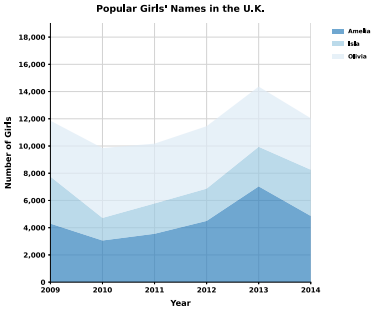
B.1.1 数据修改。 我们采用了三种数据修改方式。这些修改改变了每个可视化所关联的数值数据。

- **置换：** 调整数据点的顺序 .
- **噪声：** 为数据点添加随机噪声。 • **幅度：** 将数据点乘以某个常数值。

B.1.2 问题修改。 我们采用了两种问题修改方式。这些修改改变了问题的主题或定位。

- **主题：** 更改问题中提到的对象或主体。例如，将“金牌”更改为“铜牌”。 • **定位：** 更改问题目标的定位。例如，将“最大的是什么”更改为“最小的是什么”。

表8：研究中使用的测验变体示例问题。每个示例都展示了问题、图表和答案选项。正确答案已突出显示。有关所有有问题的全面比较，请参阅补充材料。

原始版本 (v0)	**变体1**(v1)	**变体2** (v2)
问： 哪个国家的比例最低 金牌数量最多的是哪个国家? **答：** 美国、澳大利亚 	**问：** 哪个国家的比例最低 铜牌数量? **A:** 德国、加拿大、韩 	**问：** 哪个国家的比例最高 银牌数量? **A:** 德国、英国，日本，印度尼西亚 
Q: 客户出行距离最多的是多少? **A:** 60–70公里，20–30公里，50–60公里 	**Q:** 客户出行距离最多的是多少? **答:** ，30-40 公里，20-30 公里，50-60 km 	**Q:** 客户出行距离最少的是多少? **答：** 60-70 公里，30-40 公里，50-60 公里 
问： 2012年英国取名为“Isla”的女孩与取名为“Amelia”的女孩的比例是多少? **答：** 1比1，1比3，1比4 	**问：** 2012年，名叫“Olivia”的女孩人数与名叫“Amelia”的女孩人数之比是多少? 在英国? **A:** 1 比 2、1 比 3、1 比 4 	**问：** 2011年，名叫“Isla”的女孩人数与名叫“Olivia”的女孩人数之比是多少? 在英国? **A:** 1 比 1、1 比 2、1 比 4 