

# 认知负荷视角下的中老年人数字阅读界面体验设计研究\*

侯冠华<sup>1,2</sup>, 宁维宁<sup>3</sup>, 董 华<sup>3</sup>

(1. 同济大学 建筑与城市规划学院, 上海 200092;

2. 浙江工商职业技术学院 机电学院, 宁波 315012;

3. 同济大学 设计创意学院, 上海 200092)

**摘 要** 为提升中老年人数字阅读体验, 根据认知负荷与用户体验测量理论, 采用正交实验设计方法, 以及主观测量与眼动数据相结合的技术路线, 以可用性、舒适度、阅读速度、认知负荷、眨眼率、瞳孔面积为评价指标, 评价数字阅读文字设计。结果发现影响中老年人数字移动阅读的最优体验的因素重要性排序是字号、字间距和行间距。在字号是 17 像素, 字间距加宽 0.5 磅, 1.2 倍行间距的实验条件下, 获得了最优体验和较低的认知负荷, 此外阅读体验的可用性与舒适性显著正相关, 与认知负荷显著负相关。

**关键词** 用户体验, 认知负荷, 可用性, 数字阅读界面

**中图分类号** TB472

## 1 引言

智能手机的普及让老年人享受到了数字信息技术带来的便利, 数字阅读已经成为老年人生活的重要组成部分, 然而, 数字阅读中仍存在很多问题, 如图标识别困难、字号小、难以辨认等, 严重影响了老年人的数字阅读意愿<sup>[1-3]</sup>, 尽管很多学者提出了适合手机阅读的文字字号、间距, 但手机屏幕尺寸更新速度快, 很多研究成果已经不适用于当下, 如 Wang 等<sup>[4]</sup>提出手机阅读汉字字号大小应为 15 像素, 字符间距 2~4 像素, 但由于当时实验条件下屏幕尺寸仅为 38 毫米×30 毫米, 因此该结论已不适用于目前的智能手机。此外, 过去的研究主要关注老年人阅读的效率 and 文字设计的可读性, 忽视了对用户体验的研究。本文将以文字的字号、间距为变量, 讨论这些变量对阅读体验的影响。

通常影响数字阅读体验的因素可分为内因与外因。内因方面, 中老年人正在经历认知老化的过程<sup>[5]</sup>, 主要表现在工作记忆、注意力、空间感知能力、反应时间等的改变, 这些变化会不可避免地影响他们与产品交互的体验。认知负荷理论建立在对注意和工作记忆的研究基础上, 已有研究证明, 使用同一个操作界面时, 老年人比年轻人更容易经历认知超载, 其平均操作绩效低于年轻人<sup>[6]</sup>。随着手机 APP 的快速发展, 出现了老年人打车难、春运购票难、公交卡充值难等一系列社会问题, 部分原因是界面交互复杂导致认知负荷超载, 迫使老年人放弃学习和使用 APP。因此, 预测认知负荷的分布、变化对判断用户体验优劣具有重要的参考价值, 但已有研究很少探讨认知负荷变化对用户体验的影响, 本文

\* 基金项目: 浙江省高校重大人文社会科学项目攻关计划项目(2016QN044)。

通信作者: 董华, 同济大学设计创意学院教授。E-mail: donghua@tongji.edu.cn。

将认知负荷纳入考察范围,探讨二者的影响关联机制。外因方面,文字字号、间距、界面布局、在线帮助、加载时间、图案背景等都会影响阅读体验,如 Kerber<sup>[7]</sup>发现界面布局不合理会增加中老年人操作难度;Kules 和 Xie<sup>[8]</sup>发现美国老年人在线搜索健康信息时,在线辅助内容太多,这不仅无助于找到正确信息,还会阻碍信息搜索;Bernard 等<sup>[9]</sup>发现加载时间长、文字清晰度差、复杂背景图案会减少老年人在线阅读时间;Becker<sup>[10]</sup>研究发现,老年人在线搜索信息时,动态页面会干扰阅读,降低搜索效率;Nielsen<sup>[11]</sup>发现搜索界面操作困难是降低用户体验的重要影响因素。字体、字号、间距是在数字阅读中影响体验的直接变量,但周爱保等<sup>[12]</sup>研究发现,常见字体对认知负荷影响不显著,因此本文选择将字号和间距作为操作变量,探究其对认知负荷和用户体验的影响,并进一步探索认知负荷变化与用户体验的影响机制。

认知负荷与用户体验之间的关系错综复杂。认知负荷太高或太低,用户体验都会降低。已有研究表明,认知负荷超载会迫使用户放弃任务,而过低则会引发注意力不集中,从而增加任务出错率。视觉努力是产生认知负荷的原因之一,在老年人数字阅读情境中,字号与间距变化会决定文字辨识的难易程度和视觉努力程度。已有研究多集中于任务类型和难度变化时认知负荷与用户体验的关系,由字号、间距引发,源于视觉努力产生的认知负荷变化与用户体验的关系尚待研究证实。

本文将采用主观量表与客观眼动数据相结合的方式,操纵文字大小与间距,记录用户体验和认知负荷变化情况。根据相关研究结论<sup>[13-15]</sup>,将瞳孔直径和眨眼率作为认知负荷和用户体验的重要指标,用眼动仪记录瞳孔直径、眨眼率,判断认知负荷与用户体验的变化,研究文字设计对认知负荷和用户体验的影响,研究框架见图1。

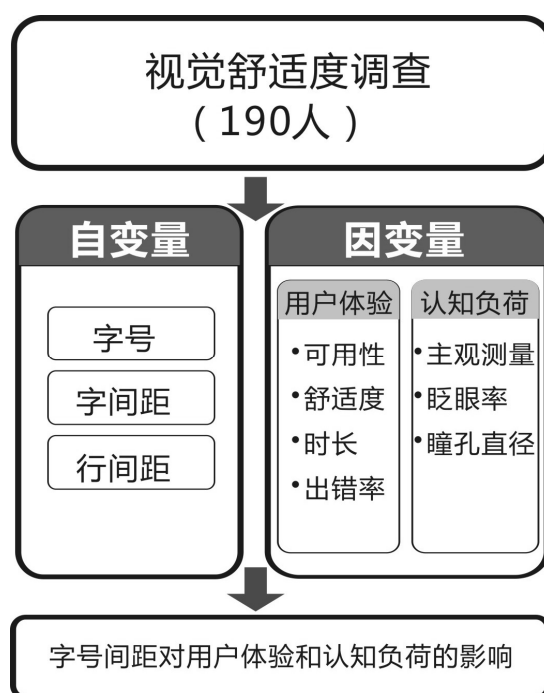


图1 总体研究框架

## 2 确定评价指标

Pass 和 van Merriënboer<sup>[16]</sup>对认知负荷的定义指出,认知负荷由反映任务与操作者交互的因果维度

和反映心理负荷、心理努力、绩效等可测性指标的评价维度组成。本文采用自我评定与眼动生理数据相结合的测量方法，测量用户认知负荷指标。

在主观测量方面，采用 PASS 自我评定量表，含心理努力评价和任务难度评价两个指标。由两个问题组成，采用 Likert 量表 9 点计分方法。虽然 PASS 量表在信度、效度方面表现都极好，但由于是主观评价，容易受社会赞许效应影响<sup>[17]</sup>，增加生理数据测量可以使测量数据更加客观准确。本文考察字号和间距对认知负荷的影响，而非阅读内容的难易对因变量的影响，因此在实验中应尽量控制内容难度。

在生理测量方面，与认知负荷有关的眼动指标包括瞳孔面积、眨眼时间及眨眼率、注视次数、注视时间等。Pass 和 Renkl<sup>[17]</sup>发现，瞳孔反应对认知负荷水平波动高度敏感。Lamberts 等<sup>[18]</sup>的研究再次确认了 Pass 和 Renkl 的发现，瞳孔扩张是显示认知负荷的有效指标。此外，研究发现<sup>[19]</sup>眨眼率与阅读任务关系密切：任务难度增大，会导致认知负荷加大，会降低眨眼率。因此，本文将瞳孔面积和眨眼率作为重要测量指标。

用户体验<sup>[19]</sup>是从产品构造、功能质量到用户情感、体验的角度研究交互质量的技术。研究者们将用户体验研究分为两部分<sup>[20]</sup>，一是系统（可用、易用、功能、目的等），二是人（需求、情感、动机、倾向等）。文献研究表明，学术界对用户体验的定义和构成还存在争议，大多数文献在进行用户体验研究中是根据实际研究问题选择用户体验构成要素，如 Hassenzahl 和 Tractinsky<sup>[20]</sup>将用户体验构成分为实用性和享乐性两种方式；Morville 和 Rosenfeld<sup>[21]</sup>将用户体验划分为可用性、有用性、易用性、可靠性、易查找、合意度、有价值七个方面对用户体验进行测评。本文考察老年人数字阅读体验的主观感受，选择可用性、舒适度、任务完成时间这三个主客观结合的衡量指标，舒适度指标符合 Hassenzahl 和 Tractinsky 提出的享乐性，可用性与任务完成时间符合 Hassenzahl 和 Tractinsky 提出的实用性。其中，可用性测量采用标准化问卷及场景后问卷进行测量，舒适度采用 Likert 量表 7 点计分方法测量。任务完成时间转换为阅读速度，换算为每秒钟阅读字数。

综上，本文将心理努力、任务难度、瞳孔面积、眨眼率作为认知负荷的评价指标，可用性、舒适度、任务完成时间作为阅读体验指标，对数字阅读界面设计进行研究。

### 3 试验方法和试验方案

#### 3.1 确定舒适值

对 190 位中老年人（50~69 岁，标准差=5.3）做了视觉舒适度调查，分别测量了电子阅读时能看到文字的最小极限值和最小舒适值、最小舒适字间距、最小舒适行间距。预实验发现，老年人的主观舒适字号往往是越大越好，但由于屏幕尺寸的限制，所选舒适值必须合理，因此在实验过程中，要求老年人选取感觉舒适的字号中最小的那个字号，称为最小舒适值。全程测试使用同一型号手机，屏幕尺寸 138.1 毫米×67.0 毫米，屏幕像素密度 326 像素值，亮度统一，测试材料分字号测试、字间距测试和行间距测试，部分测试材料如图 2 所示。

测试结果如图 3 所示，采用工效学常用的 95%为阈值，可以看出 95%的参与者感知的舒适数字字号是 20 像素，字间距是 1.0 磅，行间距是 1.4 倍。以 50%~95%的参与者比例划分舒适值范围，即中老年人数字阅读最小舒适字号范围是 14~20 像素，最小舒适字间距是在正常字间距的基础上增加 0.5~1.0 磅，最小舒适行距为 1.0~1.4 倍。

1) 玉 想 戴 球 奏 三 踩	英国国家博物馆是世界上历史最悠久、规模最宏伟的综合性博物馆，位于英国伦敦中心，是一座规模庞	英国国家博物馆是世界上历史最悠久、规模最宏伟的综合性博物馆，位于英国伦敦中心，是一座规模庞
2) 戒 慧 常 睬 亏 科 未		
3) 威 正 撑 瞧 感 运 眼		
4) 扔 冒 坏 藏 下 碗 聪	英国国家博物馆是世界上历史最悠久、规模最宏伟的综合性博物馆，位于英国伦敦中心，是一座	英国国家博物馆是世界上历史最悠久、规模最宏伟的综合性博物馆，位于英国伦敦中心，是一座规模庞
5) 钟 霜 扯 横 与 输 绿		
6) 小 霞 满 深 赵 醉 走		
7) 扮 石 维 瞧 群 山 暴 给	英国国家博物馆是世界上历史最悠久、规模最宏伟的综合性博物馆，位于英国伦敦中心。	英国国家博物馆是世界上历史最悠久、规模最宏伟的综合性博物馆，位于英国伦敦中心，是一座规模庞
8) 镇 繁 摇 票 故 投 平 川		
9) 哪 稼 卡 抖 蒙 轻 婚 马		
10) 及 藏 福 温 联 盒 块 田	英国国家博物馆是世界上历史最悠久、规模最宏伟的综合性博物馆，位于英国伦敦中心，是一座规模庞	英国国家博物馆是世界上历史最悠久、规模最宏伟的综合性博物馆，位于英国伦敦中心，是一座规模庞
11) 兼 熟 晒 磨 磨 磨 香 豆 瓜		
12) 日 兼 晒 磨 磨 磨 香 豆 瓜		

图2 文字测试材料

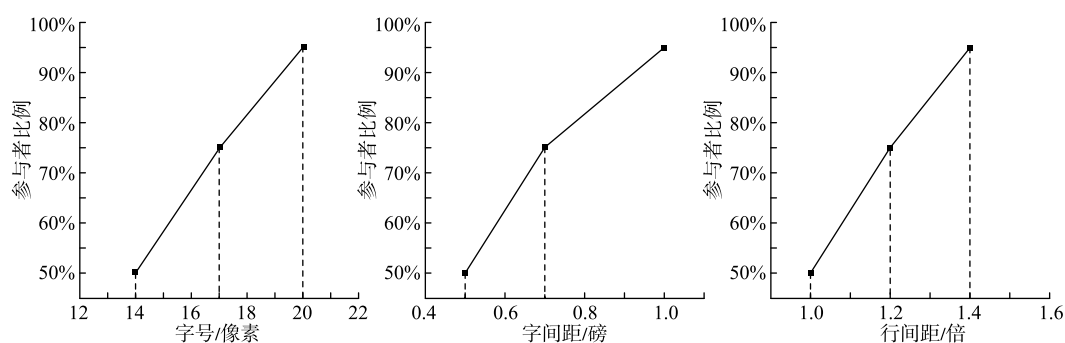


图3 最小舒适值测试结果

### 3.2 实验设计

本次实验采用  $3 \times 3 \times 3$  正交试验设计。正交设计是利用正交表，科学地安排与分析多因素试验的方法，是最常用的试验方法之一。根据周爱保等<sup>[12]</sup>的研究结论，常见字体对汉字认知加工没有显著影响，实验材料采用宋体，3个自变量分别选择字号、字间距、行间距作为研究对象，每个自变量分别由3个水平组成，根据之前的调研结果，分别采用第50%、75%和95%三个百分位数所对应的接近字号、字间距、行间距，将变量划分为3个水平。字号的3个水平分别为14像素、17像素和20像素，字间距的3个水平分别为正常间距增加0.5磅、0.7磅和1.0磅，行间距的3个水平分别为1.0倍（单倍行间距）、1.2倍和1.4倍，以确保所设计的文字令大多数老年人感觉舒适。实验顺序采用拉丁方顺序进行，避免产生顺序效应。

### 3.3 实验方案

查正交表知，3因素3水平正交实验应采用正交表  $L_9(3^4)$ ，其中L为正交代表符号，9为正交表横行数，3为因素水平数，4为正交表纵列数。

表头设计方法是各因素安排在正交表对应的位置上，一般一个因素占有一列，不同因素占有不同的列（可随机排列），如表1所示。其中A代表字号，B代表字间距，C代表行间距。把正交表上的1、2、3分别看作各个因素的水平数，正交表对应的每一行就是一个试验方案，即各因素的水平组合，空白列对试验没有影响，实验前设置  $A_1$  为20， $A_2$  为14， $A_3$  为17； $B_1$  为0.5， $B_2$  为1.0， $B_3$  为0.7； $C_1$  为1.4， $C_2$  为1.2， $C_3$  为1.0。

表 1 正交试验实验方案

因素	A	空列	B	C	实验方案
1	1	1	1	1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>
2	1	2	2	2	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>
3	1	3	3	3	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>
4	2	1	2	3	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>
5	2	2	3	1	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>
6	2	3	1	2	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>
7	3	1	3	2	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>
8	3	2	1	3	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>
9	3	3	2	1	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>

### 3.4 参与者与测试工具

实验参与者 20 名，全部来自同济大学老年大学，年龄为 61~69 岁，平均年龄 64.2 岁，其中男性 10 名，女性 10 名，所有被试在佩戴视力辅助工具后视力正常，均为右手利。

实验采取组内设计，每名参与者按照随机化顺序阅读 9 份文字材料。材料挑选时，控制其他无关变量，每份材料约 200 字 (SD=2.8)，替换生僻字，所选材料经多轮测试，对结果做单因素方差分析，更换掉差异显著材料，最后实验所用 9 份测试材料难度没有显著差异。

实验设备采用 iPhone 6，眼镜式眼动仪 Dikablis，采样率 60 赫兹，监测瞳孔面积与眨眼率。

### 3.5 测试流程

实验在同济大学包容性设计研究中心实验室开展，由于瞳孔面积易受光线影响，实验环境照明全程采用 40 瓦 LED 照明灯，每位参与者在实验室静坐 5 分钟，适应光环境后，试戴眼动仪，以测量校准时的瞳孔面积作为参考值。

考虑到认知负荷具有时间相关性原理，即认知负荷具有累积效应和时间效应，因此实验全部安排在上午 8 点 30 分~11 点 30 分进行，读完每篇短文填写一份由 7 个问题组成的测后量表，完成后放松 3 分钟，再阅读下一篇短文。平均每位参与者完成全部试验耗时约 40~50 分钟。此外，研究团队为本次实验专门开发了一款计时阅读软件，阅读开始前，手机屏幕会显示圆形黑底白字“开始”按钮，点击“开始”，屏幕自动跳转到文章页面，同时计时开始，文章阅读完成后，点击“结束”，计时结束。参与者在试用 2 次后，开始实验。实验场景如图 4 所示。



图 4 实验场景图

## 4 结果与分析

### 4.1 认知负荷结果分析

实验完成后, 检验极端数据, 排除眼疾和操作失误造成的极端数据, 最后有效样本为 16 人。对认知负荷自主评价做极差分析, 结果如表 2 所示, 极差分析结果表明, 影响数字阅读认知负荷的变量重要性排序是 A、C、B, 即字号对认知负荷影响最大, 其次是行间距, 再其次是字间距。其中 9 组实验方案中的最低认知负荷组合是  $A_1C_2B_2$ , 该组合对应的认知负荷是 2.938。但方差分析最后结果显示, 最优方案组合是  $A_1C_1B_3$ , 对应的字号是 20 像素, 行间距 1.4 倍, 字间距 0.7 磅。对认知负荷趋势进行分析可以发现, 如图 5 的子图 (a) 所示, 认知负荷在字号值为 14 像素时最高, 20 像素时最低, 但从 14 像素到 17 像素比 17 像素到 20 像素的降幅明显, 随着字体增大, 认知负荷下降趋势减缓。分析字间距变化对认知负荷的影响, 如图 5 的子图 (b) 所示, 发现字间距从 0.5 磅增至 0.7 磅时, 认知负荷下降明显, 从 0.7 磅增至 1.0 磅时, 认知负荷不降反增。图 5 的子图 (c) 显示, 行间距从 1.0 倍增至 1.2 倍时, 认知负荷下降明显, 但从 1.2 倍增至 1.4 倍时, 认知负荷变化趋零。从趋势图分析可知, 符合认知负荷最低的最优设计方案字号是 20 像素, 行间距是 0.7 倍, 字间距 1.2 磅或 1.4 磅都可以, 二者对认识负荷影响差异不大。因此文字排版时, 在每行多排字的情况下, 1.2 磅的字间距更为合理。

表 2 认知负荷正交实验分析表

实验方案	A	空列	B	C	认知负荷
1	1	1	1	1	3.375
2	1	2	2	2	2.938
3	1	3	3	3	3.500
4	2	1	2	3	5.250
5	2	2	3	1	4.125
6	2	3	1	2	4.750
7	3	1	3	2	3.500
8	3	2	1	3	3.938
9	3	3	2	1	3.375
$K_1$	3.271	4.021	4.042	3.625	
$K_2$	4.708	3.854	3.667	3.729	
$K_3$	3.604	3.875	3.875	4.226	
极差 $R$	1.437	0.313	0.375	0.601	
因素主次	ACB				
最优方案	$A_1C_1B_3$				

注:  $K$  值是单个变量每个水平数值求和的平均数;  $R$  是单个变量中  $K$  值的最大值与最小值之差

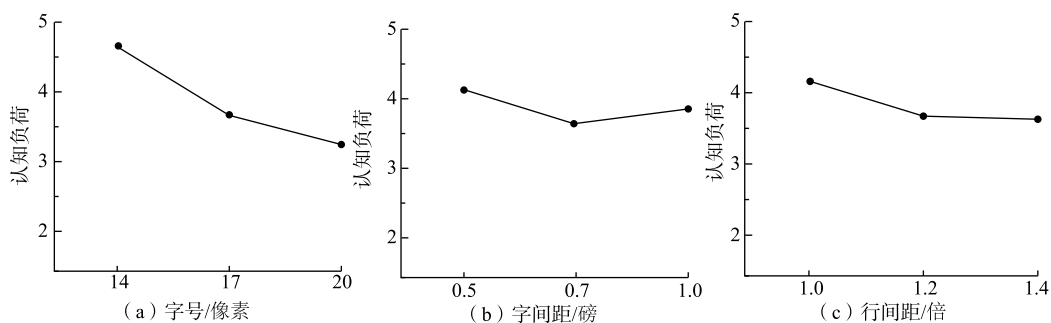


图 5 不同文字设计组合的认知负荷趋势图

## 4.2 阅读体验结果分析

阅读体验包括可用性、舒适度、阅读速度三个指标，在评价文字设计对阅读体验的影响时需综合考虑三个因素。正交实验分析结果如表3所示，字号对可用性和舒适度重要程度排第一，但对阅读速度的影响弱于字间距。字间距对可用性和舒适度重要程度排第二，对阅读速度的重要程度排第一。行间距对阅读体验的总体重要程度排第三。由于老年人阅读时，可用性和舒适度比阅读速度更加重要，因此在选择方案时，字号的重要性应当排第一。其次是字间距和行间距。

表3 阅读体验正交实验分析表

指标		A	空列	B	C
可用性评价 (均值)	$K_1$	6.579	6.271	6.424	6.410
	$K_2$	5.965	6.361	6.209	6.347
	$K_3$	4.010	6.382	6.382	6.257
	极差 $R$	0.632	0.111	0.215	0.153
	因素主次	A B C			
	最优方案	$A_1B_1C_1$			
舒适度评价 (均值)	$K_1$	6.417	6.125	6.208	6.125
	$K_2$	5.750	6.008	5.896	6.146
	$K_3$	6.200	6.145	6.271	6.104
	极差 $R$	0.667	0.137	0.375	0.042
	因素主次	A B C			
	最优方案	$A_1B_3C_2$			
阅读速度	$K_1$	3.960	3.831	4.277	4.020
	$K_2$	4.157	4.196	3.850	3.970
	$K_3$	4.010	4.010	4.004	4.140
	极差 $R$	0.197	0.365	0.462	0.153
	因素主次	BAC			
	最优方案	$B_1A_2C_3$			

分析三个指标的趋势图，如图6所示，当字号增大，用户体验和舒适度同时增大，增大趋势趋缓，两个指标增长态势趋于平行。但对于阅读速度而言，字号增大显示出阅读速度下降的趋势，即平均每秒阅读字数降低。字间距增加时，可用性和阅读速度同步下降，且趋势没有变化，但对于舒适度而言，呈现出先增长后下降的趋势，且增长幅度很小。随着行间距的增加，可用性和舒适度总体上是增长的，但增长幅度趋缓，阅读速度整体上呈下降趋势。总体而言，字号从17像素增至20像素，对可用性和舒适度的提升差异不大，在综合考虑阅读速度的情况下，选择17像素更合理。字间距方面，可用性和阅读速度的峰值是0.5磅，舒适性峰值是0.7磅，综合考虑字间距最优值是标准间距增加0.5磅。行间距综合考虑阅读体验和认知负荷，最优值是1.2倍。

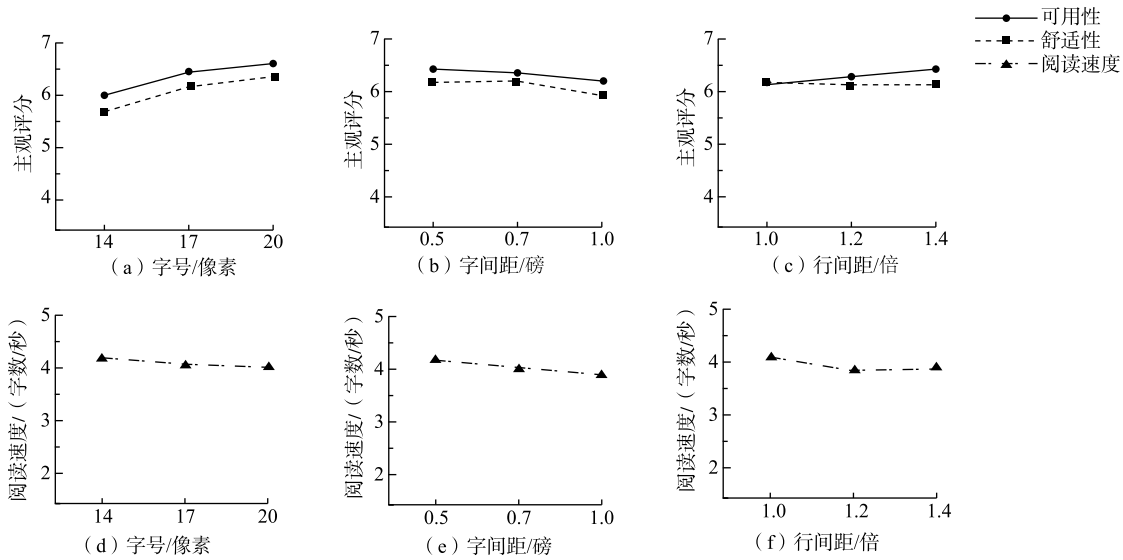


图6 不同文字设计组合的阅读体验综合趋势图

### 4.3 眼动指标分析

眨眼率和瞳孔面积两个指标实验数据如表4所示, 分别对眨眼率和瞳孔面积做正交实验方差分析, 发现文字字号、字间距、行间距对眨眼率 ( $F$  字号=1.008,  $p=0.5$ ,  $F$  字间距=1.147,  $p=0.405$ ,  $F$  行间距=0.841,  $p=0.543$ )、瞳孔面积 ( $F$  字号=5.558,  $p=0.153$ ,  $F$  字间距=2.04,  $p=0.329$ ,  $F$  行间距=2.824,  $p=0.216$ )、瞳孔面积变化 ( $F$  字号=0.238,  $p=0.808$ ,  $F$  字间距=1.724,  $p=0.367$ ,  $F$  行间距=1.726,  $p=0.364$ ) 的主效应均不显著, 即文字设计对眼动指标的影响作用不显著。

表4 眼动指标实验数据

实验方案	1	2	3	4	5	6	7	8	9
眨眼率	1.89%	1.91%	1.92%	2.19%	1.54%	1.72%	2.01%	1.98%	2.11%
瞳孔面积/像素	817.7	603.9	742.6	709.3	719.1	768.9	740.2	973.5	992.9
瞳孔面积变化/像素	455.8	421.7	603.9	524.1	460.7	522.2	499.1	911.7	359.2

进一步对主客观数据进行分析, 发现瞳孔面积与认知负荷主观评价相关性显著 ( $r=-0.712$ ,  $p=0.031$ ), 瞳孔面积越大, 认知负荷主观评价越低, 眼动指标作为客观数据支持上述主观数据分析结论。另外, 眨眼率与可用性主观评价相关性显著 ( $r=-0.705$ ,  $p=0.034$ ), 与舒适度相关性显著 ( $r=-0.674$ ,  $p=0.046$ ), 眨眼率越高, 可用性和舒适度越差, 这一结论也客观上支持主观数据的分析结果。

### 4.4 阅读体验、主观认知负荷关系分析

阅读体验由可用性、舒适度、阅读速度构成, 主观认知负荷由 Pass 量表测得, 对 4 个因素做 Pearson 双侧检验相关分析, 结果如表 5 所示, 可用性与舒适度显著正相关 ( $r=0.931$ ,  $p=0.01$ ), 可用性与认知负荷显著负相关 ( $r=-0.894$ ,  $p=0.01$ ), 舒适度与认知负荷显著相关 ( $r=-0.767$ ,  $p<0.05$ )。即降低视觉负荷, 可用性和舒适度得到了提升。从统计结果来看, 阅读速度与可用性和舒适度存在负相关关系, 但程度很低, 相关性不显著; 与认知负荷存在正相关关系, 但程度较低, 同样不显著。



表 5 主客观指标实验数据相关性分析

主客观指标	可用性	舒适度	认知负荷	阅读时间	左瞳孔面积	右瞳孔面积	眨眼率
可用性	1						
舒适度	0.931**	1					
认知负荷	-0.894**	-0.767*	1				
阅读时间	-0.264	-0.324	-0.001	1			
左眼瞳孔面积	0.566	0.420	-0.712*	0.082	1		
右眼瞳孔面积	0.574	0.496	-0.716*	0.136	0.918**	1	
眨眼率	-0.705*	-0.674*	0.648	0.489	-0.633	-0.611	1

\*\*表示在 0.01 水平（双侧）上显著相关；\*表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关

## 5 讨论

### 5.1 文字设计与阅读体验

据 Mayer 等<sup>[22]</sup>提出的多媒体学习的认知理论模型，数字阅读文本通过眼睛进入感觉记忆，读者从感觉记忆中选择相关的语言和图像进行加工，加工过程在工作记忆中完成，通过与长时记忆的知识进行整合，从而达到阅读理解。本文中，针对阅读内容做了平衡，因此，在工作记忆加工阶段与长时记忆知识整合阶段，不存在显著差异。本文特别针对文字设计，这一阶段属于视觉信息输入阶段，由于老年人视力出现衰退，在视觉输入阶段需要付出额外的视觉努力。根据双重编码理论<sup>[23]</sup>，大脑对视觉文字信息的处理与图片相同，都通过特征识别的方式进行，因此当字号较小、视力衰退同时出现时，读者不仅看清文字的难度增加，识别文字的难度也同样在增加。对表 3 所示的实验结果进一步做方差分析发现，字号对可用性 ( $F=34.31, p=0.028$ ) 和舒适度 ( $F=16.06, p=0.05$ ) 的影响主效应显著。字间距和行间距在文字识别中有干扰作用的负效应，即当字间距很小时，辨识难度增加，且由于视觉中央凹同时处理的文字较拥挤，会出现将之前识别过的文字认作现在看的文字的现象。行间距较小时也会产生相同的效应，导致看错行。本文中的文字设计对字号、字间距和行间距在舒适度调查的基础上，进一步优化，实验结果发现字号、字间距、行间距对老年阅读者而言，并不是越大越好，从趋势分析中发现，文字的三个变量在变大的过程中，个别变量会使阅读体验先升后降，原因在于虽然文字识别容易了，但视觉中央凹处理信息减少，加工下一个信息时，眼跳距离增加，从而导致阅读体验下降。

Wang 等<sup>[4]</sup>在 2010 年对老年人手机汉字的字间距、行间距的研究发现，加大文字间距会提升手机文字的可读性，这一结果与本文的部分结论一致。但由于受变量水平选择范围限制，Wang 等的研究并未发现过分增加字间距也会导致舒适度和可用性下降。本文发现，增加字间距的确可以提升文字阅读体验，但字间距过大也会降低阅读体验，如图 6 的子图 (b) 所示。周爱保等<sup>[12]</sup>关于字号的研究发现，字号大小与识别速度正相关，但由于其实验过程采用了单个词组或文字的呈现方式，因此与本文的结论并不相符。本文中，增加字号，阅读速度呈现下降趋势，如图 6 的子图 (a) 所示。这是由于在有限的手机屏幕尺寸中，文字呈现的数量随着字号增加而减少，降低了阅读的连贯性，某种程度上，延长了阅读理解的时间。

国外对文字研究也非常多，如 Goodman-Deane 等<sup>[24]</sup>，Alotaibi<sup>[25]</sup>等的研究证实字号对阅读绩效具有非常显著的影响，Goodman-Deane 等的研究还进一步指出，在印刷文本中，老年人的字号应当选择比最小舒适字号大 20% 的字号。这一结论支持了本文的实验结果：字号超出 50% 参与者感觉舒适的字号

时, 阅读的可用性和舒适性仍有明显上升, 但继续增加时, 上升趋势减缓。由于中英文在构成上的差异, 汉字很难用字号尺寸的百分比进行精确计算, 因此, 本文认为, 满足 75% 的老年人感受到舒适的字号更适合作为老年人数字阅读的首选字号。

## 5.2 文字设计、认知负荷与阅读体验

在数字阅读和多媒体学习中, 认知负荷一直被认为是影响阅读效率和学习绩效的一个重要因素。认知负荷是信息处理时占用的心理资源总量, 分为中枢处理资源、响应资源、空间编码资源、语言编码资源、视觉接收资源、听觉接收资源、操作资源 7 个维度<sup>[26]</sup>。本文中, 仅改变了视觉接收资源, 其他资源如响应、空间、听觉、操作等在阅读任务中并不涉及, 中枢处理和语言编码通过平衡任务难度的方式予以处理。研究中通过控制文字设计, 考察了视觉接收资源的变化情况。因此, 研究中所考察的认知负荷实质仅是视觉认知负荷, 不涉及其他维度的认知负荷。实验结果表明, 影响视觉认知负荷的文字变量重要性排序依次是字号、行间距、字间距。与阅读体验不同, 字间距与行间距的重要性发生了变化, 这可能是用户对认知负荷的评价更偏重整体, 而对可用性和舒适度的评价更偏重于文字本身造成的。眼动数据处理发现, 眼动测量指标与认知负荷主观测量相关性显著, Hankins 和 Wilson<sup>[27]</sup>的研究证实, 眨眼率与任务难度有关, 由于本文平衡掉了文章难度, 因此眨眼率、瞳孔面积等眼动指标变化应主要源于文字设计。

已有研究中, 如李宁等<sup>[15]</sup>发现, 汉字字号对认知负荷的主效应显著, 字号越大认知负荷越低, 这一结论与本文结论基本一致, 如图 5 的子图 (a) 所示, 随着字号增加, 认知负荷下降, 但下降趋势减缓。与阅读体验的比较可以发现, 在认知负荷降低时, 阅读的可用性和舒适度提升, 但提升趋势减缓。因此, 在一定范围内, 文字字号增加会降低认知负荷, 提升阅读体验。李晶等<sup>[28]</sup>的研究提出, 均衡认知负荷是提升工作绩效的重要路径, 同样, 将认知负荷控制在合理范围内, 有助于提升阅读体验, 如图 5 的子图 (b)、图 6 的子图 (b) 所示, 随着字间距增加, 认知负荷呈现缓慢下降趋势, 阅读体验没有显著提升, 反而也缓慢下降。这一现象说明, 降低认知负荷并非越低越好。当负荷过低时, 阅读体验也会下降。

## 6 结束语

综合考察中老年人的阅读体验与认知负荷, 得出以下结论。

在理论层面, 在文献研究的基础上, 选取了适用于阅读体验的测量维度, 认知负荷的测量指标, 通过控制实验, 发现了认知负荷与阅读体验具有显著的负相关性, 阐明了字号、间距的变化对阅读体验、认知负荷的影响趋势。分别从可用性、舒适度、阅读速度等三个方面, 探讨了适合老年人阅读的字号、间距的合理取值范围, 为无障碍交互提供了理论基础。理论研究发现, 首先, 认知负荷应适当控制在合理水平, 保持认知负荷既不高, 也不低, 才能提升老年人的数字阅读体验。其次, 本文中, 字号、间距对认知负荷、用户体验的影响是不同的, 应区别对待。字号增加, 认知负荷降低, 阅读体验提升, 但随着字号的不断增大, 认知负荷降低趋势与阅读体验提升的趋势都明显减缓。字间距增加尽管降低了认知负荷, 但同样降低了阅读体验, 因此在实践中, 字间距的增幅不宜过大。

在实践层面, 通过实验提出了适合中老年人数字阅读的文字设计最优组合: 字号 17 像素, 字间距增加 0.5 磅, 行间距 1.2 倍, 即单倍行间距的 1.2 倍。在不同的阅读环境中, 根据老年人对可用性、舒适度和阅读时间的需求, 选取合理的字号、间距, 如说明书设计侧重可用性, 推荐选择字号 20 像素, 字间距增加 0.5 磅, 行间距 1.4 倍, 如表 3 所示。本文为不同阅读目的和环境的阅读体验提供了文字设计

的实践操作方案。

研究还存在许多局限,如实验选取的对象样本仅 20 位老年人,不能完全有效代表国内全体老年人,实验中控制了任务难度,仅从文字字号、间距考察其对用户体验和认知负荷的影响,但在现实中,阅读任务的难度会显著影响阅读体验和认知负荷,因此,后续研究还需不断完善,以更加全面地揭示认知负荷与用户体验的关系。

## 参 考 文 献

- [1] Portello J K, Rosenfield M, Bababekova Y, et al. Computer-related visual symptoms in office workers[J]. *Ophthalmic & Physiological Optics*, 2012, 32 ( 12 ) : 375-382.
- [2] Gowrisankaran S, Sheedy J E, Hayes J R. Eyelid squint response neurasthenia-inducing conditions[J]. *Optometry and Vision Science*, 2007, 84 ( 5 ) : 611-619.
- [3] Tsubota K, Nakamori K. Dry eyes and video display terminals[J]. *New England Journal of Medicine*, 1993, 32 ( 8 ) : 584-585.
- [4] Wang L, Sato H, Rau P L, et al. Chinese text spacing on mobile phones for senior citizens[J]. *Educational Gerontology*, 2009, 35 ( 7 ) : 77-90.
- [5] Papalia D E. *Experience Human Development*[M]. New York: MIT Press, 1997.
- [6] Rosenfield M, Jahan S, Nunez K, et al. Cognitive demand, digital screens and blink rate[J]. *Computers in Human Behavior*, 2015, 51 ( 13 ) : 403-406.
- [7] Kerber N. “Web usability for seniors: a literature review” [EB/OL]. [http://home.ubalt.edu/nicole.kerber/idia612/Kerber\\_Literature\\_Review.pdf/](http://home.ubalt.edu/nicole.kerber/idia612/Kerber_Literature_Review.pdf/), 2013-12-28.
- [8] Kules B, Xie B. Older adults searching for health information in Medline Plus—an exploratory study of faceted online search inter-faces[C]. *Proceedings of the 74th Annual Meeting of the American Society for Information Science & Technology*. Silver Spring: ASIST, 2011.
- [9] Bernard M, Liao C H, Mills M. The effects of font type and size on the legibility and reading time of online text by older adults[C]. *Proceedings of ACM Conference on Human Factors in Computing Systems 2001*. Seattles: ACM, 2001.
- [10] Becker S A. A study of web usability for older adults seeking online health resources[J]. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction ( TOCHI )*, 2004, 11 ( 4 ) : 387-406.
- [11] Nielsen J. “Seniors as Web users” [EB/OL]. <http://www.useit.com/alertbox/seniors.html>, 2013-12-30.
- [12] 周爱保, 张学民, 舒华, 等. 字体、字号和词性对汉字认知加工的影响[J]. *应用心理学*, 2005, 11 ( 2 ) : 128-132.
- [13] Goodman D, Waller J, Latham S, et al. Differences in vision performance in different scenarios and implications for design[J]. *Applied Ergonomics*, 2016, 55 ( 1 ) : 149-155.
- [14] Williamson K. The role of research in professional practice: with reference to the assessment of the information and library needs of older people[J]. *Australasian public Libraries and Information Services*, 1999, 12 ( 4 ) : 145-153.
- [15] 李宁, 梁宁建, 林小革. 不同认知负荷汉字输入的眼动研究[J]. *心理科学*, 2008, 31 ( 1 ) : 54-57.
- [16] Pass F, van Merriënboer J J G. Instructional control of cognitive load in the training of complex cognitive tasks[J]. *Educational Psychology Review*, 1994, 6 ( 4 ) : 351-371.
- [17] Pass F, Renkl A, Sweller J. Cognitive load theory and instructional design: recent developments[J]. *Educational Psychologist*, 2003, 38 ( 1 ) : 1-4.
- [18] Lamberts J, van den Breuk P L C, Bener L, et al. Correlation dimension of the human electroencephalogram corresponds with cognitive load[J]. *Neuropsychobiology*, 2004, 41: 149-153.
- [19] 龚德英. 多媒体学习中认知负荷的优化控制[D]. 西南大学博士学位论文, 2009.
- [20] Hassenzahl M, Tractinsky N. User experience—a research agenda[J]. *Behavior & Information Technology*, 2006, 25 ( 3 ) : 91-97.
- [21] Morville P, Rosenfeld L. *Information Architecture for the World Wide Web*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [22] Mayer R E, Heiser J, Lonn S. Cognitive constraints on multimedia learning: when presenting more material results in less understanding[J]. *Journal of Educational Psychology*, 2001, ( 1 ) : 187-198.
- [23] Mayer R E, Massa L. Three facets of visual and verbal learners: cognitive ability, cognitive style, and learning preference[J]. *Journal of Educational Psychology*, 2003, 95 ( 4 ) : 833-841.
- [24] Goodman-Deane J, Waller S, Latham K, et al. Differences in vision performance in different scenarios and implications

- for design[J]. Applied Ergonomics, 2016, (55): 149-155.
- [25] Alotaibi A Z. The effect of font size and type on reading performance with Arabic words in normally sighted and simulated cataract subjects[J]. Clinical and Experimental Optometry, 2007, 90 (3): 203-206.
- [26] Tsang P S, Velazquez V L. Diagnosticity and multidimensional subjective workload rating[J]. Ergonomics, 1996, 39 (3): 358-381.
- [27] Hankins T C, Wilson G F. A comparison of heart rate, eye activity, EEG and subjective measure of pilot metal workload during flight[J]. Aviation, Space and Environmental Medicine, 1998, 69 (4): 360-367.
- [28] 李晶, 薛澄岐, 王海燕, 等. 均衡时间压力的人机界面信息编码[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2013, 25 (7): 1022-1028.

## Research on Older User's Experience in Digital Reading from a Cognitive Load Perspective

HOU Guanhua<sup>1, 2</sup>, NING Weining<sup>3</sup>, DONG Hua<sup>3</sup>

(1.College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2.College of Mechanical Electrical Engineering, Zhejiang Business and Technology Institute Ningbo 315012, China;

3.College of Design and Innovation, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** This article aims to improve the digital reading experience of older people. Based on the cognitive load theory and user experience measurement, an orthogonal experiment design was conducted. Subjective measurement and eye movement data were used to assess the digital reading experience of older people. The usability, comfort, reading speed, cognitive load, blink rate, pupil area were used to evaluate the text design of digital reading materials. It was found that the key factors that influence the optimal experience of digital reading for older people were font size, word spacing and line spacing. Under the experimental conditions of the font size 17px, 0.5pt extra word spacing and 1.2-line spacing, the optimal experience was obtained with lower cognitive load. In addition, the usability of the reading experience was significantly positively correlated with the subjective perception of comfort, but negatively correlated with cognitive loads.

**Key words** user experience, cognitive load, digital reading interface, usability

### 作者简介

侯冠华(1982—),男,同济大学建筑与城规学院2015级博士研究生,浙江工商职业技术学院讲师,研究方向为用户体验、交互设计、神经工业设计。E-mail: 50477041@qq.com。

宁维宁(1990—),男,同济大学设计创意学院2014年级硕士研究生,研究方向为包容性设计。E-mail: 442883982@qq.com。

董华(1976—),女,同济大学设计创意学院教授、博士生导师,研究方向为包容性设计。E-mail: donghua@tongji.edu.cn。