

基于 FTA 的老年人 APP 交互设计

陈则言, 李永锋, 朱丽萍

(江苏师范大学, 徐州 221116)

摘要: **目的** 提升老年人对 APP 的满意度, 帮助老年人更好地接受和使用 APP。**方法** 提出基于故障树分析 (FTA) 的老年人 APP 交互设计方法。首先通过焦点小组确定导致错误发生的原因并建立故障树, 对错误发生的原因进行合理分类; 随后对故障树进行定性定量分析, 计算故障树的最小切集和错误发生的概率, 找到导致头号事件发生的核心因素; 接着进行重要度分析, 计算构造重要度, 根据构造重要度值对引起错误发生的基本事件进行排序, 为设计改良提供理论上的优先顺序; 最后以老年人医疗 APP 为研究案例进行设计改良, 并对改良后的结果进行错误率验证。**结论** 该方法可以有效地发现老年人操作 APP 时出现障碍的原因, 不仅可以帮助设计师找到较为合理的改良方案, 而且还可以使老年人获得良好的交互体验。

关键词: 交互设计; 故障树分析; 医疗 APP; 老年人

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)22-0190-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.22.033

Interaction Design of Elderly APP Based on FTA

CHEN Ze-yan, LI Yong-feng, ZHU Li-ping

(Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the elderly's satisfaction with APP and help them to accept and use it better. Interaction design method of APP for the elderly based on fault tree analysis (FTA) was proposed. Firstly, the focus group determined the causes of the error and established the fault tree, and classified the causes of the error reasonably; then qualitatively and quantitatively analyzed the fault tree, calculated the minimum cut set of the fault tree and the probability of error occurrence, and found the core factors that led to the top events; then, the group carried out the importance analysis, calculated the structural importance, sorted the basic events that caused the errors according to the structural importance values, and provided the theoretical priority for the design improvement; finally, with the elderly medical APP as the research case, the design improvements were made and the error rates were verified for the improved results. The proposed method can effectively find out the causes for the obstacles in the operation of APP for the elderly. It can not only help designers find more reasonable improvement programs, but also enable the elderly to get a good interactive experience.

KEY WORDS: interaction design; FTA; medical APP; elderly

随着移动互联网的快速发展, 移动应用 (以下简称 APP) 已经成为人们生活不可或缺的一部份。随着老年人口规模不断膨胀、老龄化程度持续加深^[1], 越

来越多的老年人开始接触并使用 APP。然而, 目前市场上大多数 APP 不能满足老年人的实际需求, 老年人因其特殊的生理、心理等原因, 在使用时会出现比

收稿日期: 2019-07-08

基金项目: 教育部人文社会科学研究青年基金项目 (15YJCZH245); 江苏省高校哲学社会科学研究项目 (2019SJA0930)

作者简介: 陈则言 (1992—), 男, 江苏人, 江苏师范大学硕士生, 主攻用户体验和产品设计。

通信作者: 李永锋 (1979—), 男, 陕西人, 博士, 江苏师范大学副教授, 主要从事产品设计、人机交互、感性工学等方面的研究。

年轻人更多的障碍和错误。影响老年人操作错误的因素有很多,设计师凭主观经验难以从根本上解决老年人操作失败的问题,因此,需要寻找合适的方法来确定老年人操作 APP 失败的根本原因。

目前老年人 APP 交互设计研究主要分为两类:一类是从交互行为的角度出发,分析老年人 APP 交互的特征,如通过对老年人视觉识别设计进行研究,对界面的文字、色彩、版式等设计进行了详细的评述^[2-3];另一类是基于现有的设计原则对老年人 APP 进行研究,如通过对老年人感官识别、功能认知、行为关联等方面进行研究,得出老年人 APP 设计应遵循视觉完美化、操作多样化和界面一致性等原则^[4-6]。综上所述,现有的研究大多集中在对老年人用户调研、生理心理等分析的定性研究方法,对老年人操作失误的原因分析单一化,未考虑到导致失误更深层次的原因,因此,对老年人 APP 设计改良存在模糊性。

故障树分析法(以下简称 FTA)采用图形表达的方式绘制故障树图形,并进行清晰、高效的逻辑推理,是一种分析失效原因的方法,可以帮助设计师找到失效的最终原因^[7]。基于此,本研究提出将 FTA 方法应用于老年人 APP 交互设计,绘制出故障树图对老年人 APP 操作失误进行深入系统分析,对发生的失效事件进行定性定量分析,找出失败的主要原因,并采取针对性的解决措施,得到合理的解决方案^[8]。

1 理论背景

FTA 是由华生和汉塞尔提出^[9],是一种确定失效事件原因和意外事件发生概率的解析方法,从头号事件开始向下分析推导事故发生的原因,通过逻辑演绎和图形方式来表示可能的失效事件组合,了解各失效事件之间的相互关系。

故障树分析法是一种较为成熟的分析方法,不仅可以分析各种失效状态,而且还可以对故障产生的各种潜在因素进行分析并及时解决,在对可靠性、安全性分析和风险评估上得到了广泛应用。如张根宝等通过故障树建立了复杂电机产品的故障分析模型^[10];刘家琨将故障树分析运用在信息化高科技产品的安全性设计中,表明该方法可以有效分析系统的薄弱环节,提高系统的安全性^[11]。

故障树分析运用在老年人 APP 设计中,该方法帮助老年人找到操作失误的原因,并对这些原因进行更为详细地分析,在未来的设计中能更好地避免这些原因,达到改良的效果。

2 研究方法

本研究提出基于故障树分析法的老年人 APP 设计,对可能造成老年人发生失误的各种因素进行分析,以确定影响老年人 APP 使用障碍的各种原因组

合,从而达到优化设计的目的。其步骤主要包括:故障树的建立、故障树定性分析、故障树定量分析、设计改良和结果验证,研究研究方法流程见图 1。

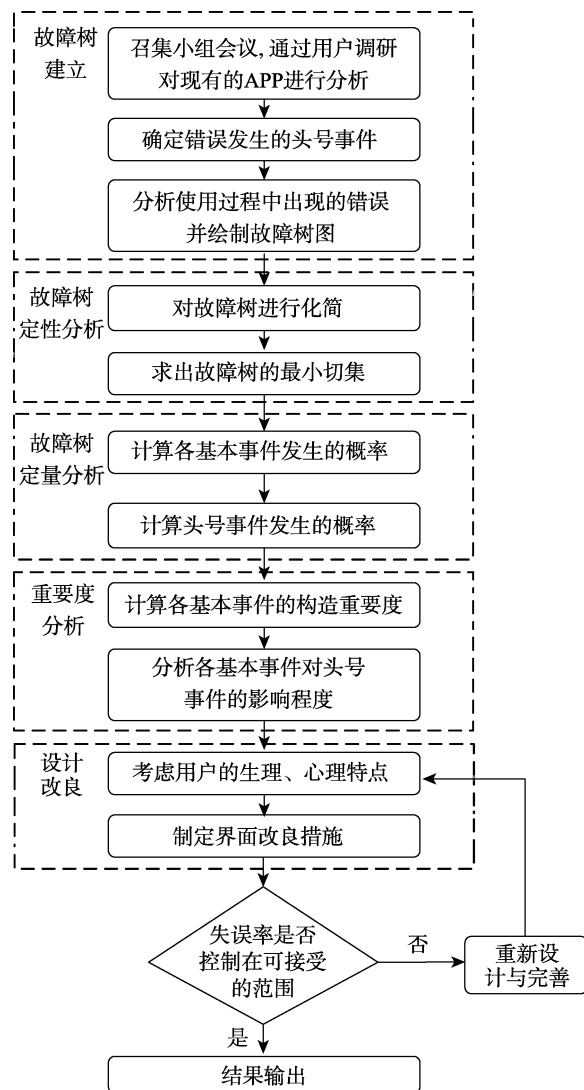


图 1 研究方法流程

Fig.1 Research method flow

2.1 老年人 APP 故障树建立

建立故障树是为了充分了解错误发生的潜在因素以及各因素之间的相互关系,通常情况下按照如下 3 步建立故障树^[12]: (1) 调查用户错误发生的原因,首先成立老年人 APP 专家小组,然后通过访谈、问卷调查的方法对现有的 APP 进行调查研究,分析用户在使用过程中发生失误的原因;(2) 确定错误发生的头号事件,头号事件的选择是建立故障树的核心,确定老年人 APP 操作失误头号事件,列举出老年人不希望发生的事件,然后从交互设计角度考虑,筛选出符合选择条件且等级为 I 级的事件作为头号事件,头号事件的分类及选择条件见表 1;(3) 采用逻辑演绎法将错误发生的原因以图形化表示,将头号事件放入顶部矩形框内,再分解为各类潜在的原因,例如导

致老年人 APP 操作失误的原因包括硬件因素、人为因素等,并置于故障树的下一层级,根据各原因之间的逻辑关系用适当的逻辑符号连接头号事件和原因事件,针对上一原因,将问题再分解成更细的因素或潜在原因,直到无法建立进一步的原因,最终在故障树末端的事件为基本事件,为逻辑上的独立事件,故障树所使用的逻辑符号及意义说明见表 2。

表 1 头号事件的分类及选择条件
Tab.1 Classification and selection of top events

等级	分类标准	选择条件
I	损害产品功能	可以明确地下定义;包
II	阻碍产品部分功能的使用	含潜在的发生原因;具
III	轻微阻碍产品功能的使用	有可弥补的性质。

表 2 故障树所使用的逻辑符号及意义说明
Tab.2 Logical symbols and meaning descriptions used by the fault tree

名称	符号	意义
AND 闸		代表其子项目都同时存在或发生的情况下,其母项目才会存在
OR 闸		代表其子项目中任一个或一个以上存在或发生时,其母项目即存在
事件		代表在系统中一个已经很明确的事情。常用 AND 闸或 OR 闸输入或输出,有进一步分析可能的事件
基本事件		代表系统中的某一基本事件,无需加以进一步分析
未展开事件		代表一件发展未完全或无需展开说明的事件

2.2 故障树定性分析

故障树定性分析的目的是寻找故障树的最小切集^[13],最小切集是导致头号事件发生全部失效事件的组合方式,是部件失效的最小组合,如果这个组合中的部件失效,就会导致头号事件发生,以此来分析老年人 APP 操作失误的各种原因。

最小切集的计算过程如下:从故障树的头号事件开始,从上而下,把头号事件表示成基本事件的布尔代数,常见的布尔代数规则有交换律、结合律、分配律、幂等律、吸收律 5 种,即:

- 交换律
- $$x \bullet y = y \bullet x$$
- $$x + y = y + x$$
- 结合律
- $$x(y \bullet z) = (x \bullet y) \bullet z$$
- $$x + (y + z) = (x + y) + z$$
- 分配律
- $$x \bullet (y + z) = x \bullet y + x \bullet z$$
- $$x + (y \bullet z) = (x + y) \bullet (x + z)$$
- 幂等律
- $$x \bullet x = x$$
- $$x + x = x$$
- 吸收律
- $$x \bullet (x + y) = x$$
- $$x + (x \bullet y) = x$$
- (1)

(2)

(3)

(4)

(5)

(6)

(7)

(8)

(9)

(10)

2.3 故障树定量分析

故障树定量分析的主要任务是计算头号事件发生的概率^[14],对老年人 APP 操作失误的原因作出定量评价。通过调研获得基本事件的发生概率,即可计算出故障树头号事件发生的概率。针对一个具有 n 个最小切集的 $C_1, C_2, C_3 \cdots, C_n$ 故障树而言,故障树的条件假设得到各个最小切集的基本事件相互独立,该故障

树头号事件发生的概率是各个最小切集发生概率之和^[15]。

$$P(T) = \sum_{j=1}^n \left(\prod_{i \in C_j} F_i(t) \right)$$

(11)

其中 $P(T)$ 代表头号事件发生概率, i 和 j 代表基本事件的序数, C 为最小切集的个数, $i \in C_j$ 为第 i 个基本事件属于第 C_j 个最小切集, $F_i(t)$ 为基本事件发生概率。

2.4 构造重要度分析

由于每个基本事件的故障概率导致头号事件发生所起的作用各不相同,所以需要进行故障树基本事件的重要度分析。本文将引入构造重要度对基本事件进行分析^[16],构造重要度是故障树中某个基本事件的状态由失效转化为正常时,故障树中增加的基本事件正常状态的数量,通常按照如下 3 步进行构造重要度的计算:(1)确定基本事件的个数 n ;(2)完成基本事件状态表,基本事件存在“不发生”和“发生”的任一状态,假设用“0”代表不发生,“1”代表发生,如果有 2 个基本事件 A 和 B,其各种状态的基本事件状态见表 3,此表被称为基本事件状态表;(3)计算构造重要度,先提出某一基本事件,例如基本事件 A,除 A 以外基本事件状态不变的条件下,只对基本事件 A 存在变化的各项作比较,观察头号事件是否从“0”变为“1”,最后统计存在这种状态的数量,这种变化表示基本事件 A 发生会引起头号事件的发生,计算公式如下所示:

$$I_s(i) = \frac{1}{2^{n-1}} \times n_s(i) \tag{12}$$

其中 $I_s(i)$ 为第 i 个基本事件的构造重要度, n 为故障树中基本事件的数量, $n_s(i)$ 表示第 i 个基本事件的状态由发生转化为不发生时, 增加的不发生状态的数量。

表 3 基本事件状态
Tab.3 Basic event states

状态编号	基本事件 A	基本事件 B	头号事件状态
1	0	0	0
2	0	1	0
3	1	0	1
4	1	1	1

2.5 设计改良

针对以上 FTA 定性定量分析结果, 对 APP 的操作任务进行分析, 分别从界面样式、信息架构两个方面对 APP 进行改良^[17], 界面样式设计中准确组织好视觉元素, 可以有效地传达出行为和信

息、情绪等方面的影响, 权衡各事件之间的冲突部分, 避免改良结果影响到其他事件。

2.6 结果验证

针对改良后的方案, 对老年人用户群体再次进行了实验, 观察每位被试的平均错误率^[18], 如果错误率显著降低, 说明改良后的界面在接受范围内; 如果错误率降低不明显, 则进一步完善设计, 直至错误率明显降低。

3 案例研究

随着智能手机的普及和老年人健康意识的提高, 越来越多的老年人开始尝试使用医疗 APP, 因此, 研究选择老年人移动医疗 APP 作为研究对象。研究邀请了 50 名具有智能手机使用经验的老年人作为被试, 其中包括男性 25 名、女性 25 名, 平均年龄为 62.5 岁, 职业包括退休教师、在职学校宿舍管理人员、电子元器件公司退休职员等, 使用智能手机均超过 3 年。研究以“智慧医疗 APP”为案例, 该 APP 在移动医疗市场中下载率、使用率较高, 具有代表性, 智慧医疗 APP 部分实验界面见图 2。



图 2 智慧医疗 APP 部分实验界面
Fig.2 Part of the experimental interface of Wisdom Medical APP

3.1 老年人医疗 APP 故障树建立

建立老年人医疗 APP 故障树应充分了解老年人操作时发生的错误, 分析这些错误发生的潜在因素以及各因素之间的相互关系, 建立故障树通常情况下按照如下 3 步进行。

第一, 本研究对 50 名老年人进行调研访谈后, 通过焦点小组法(其中 2 名是有 3 年工作经验的交互设计师、2 名设计学专业教师、1 名神经外科主任医

生、3 名老年人)确定老年人医疗 APP 操作过程中最不希望发生的错误事件以及发生原因。

第二, 在实验中把被试最不希望发生的事件作为头号事件。对于老年人医疗 APP, 需选择具有较高使用频率且操作错误率高的任务作为头号事件, 头号事件选择见表 4。在符合选择条件的事件中, 老年人医疗 APP 挂号失败的等级为 I 级, 因此, 将此事件定位头号事件。

表 4 头号事件选择
Tab.4 Selection of top events

序号	待选头号事件	是否符合头号事件选择条件	等级
1	老年人医疗 APP 无法正常打开	是	Ⅱ
2	老年人医疗 APP 现有功能无法令使用者满足	否	Ⅲ
3	老年人医疗 APP 挂号失败	是	I
4	老年人医疗 APP 使用不方便	否	Ⅲ
5	老年人医疗 APP 运行不稳定	否	Ⅲ

第三，确定头号事件后，对事件发生的原因进行分析，列出可能引起头号事件发生的原因事件。原因分析的目的是确定发生错误背后隐含的深层原因，并把这些事件作为中间事件再去寻找更深层次的原因。如对于引起挂号失败的原因可分为界面因素、认知因素等，而界面因素影响下可以得出界面样式设计不当和信息架构设计不合理等原因事件，然后对其再进行分析，逐级查找，直到无法找到更深层次的原因为止。完成查找后将每个中间事件用逻辑符号将头号事件与基本事件相连，老年人医疗 APP 挂号失败故障树见图 3。

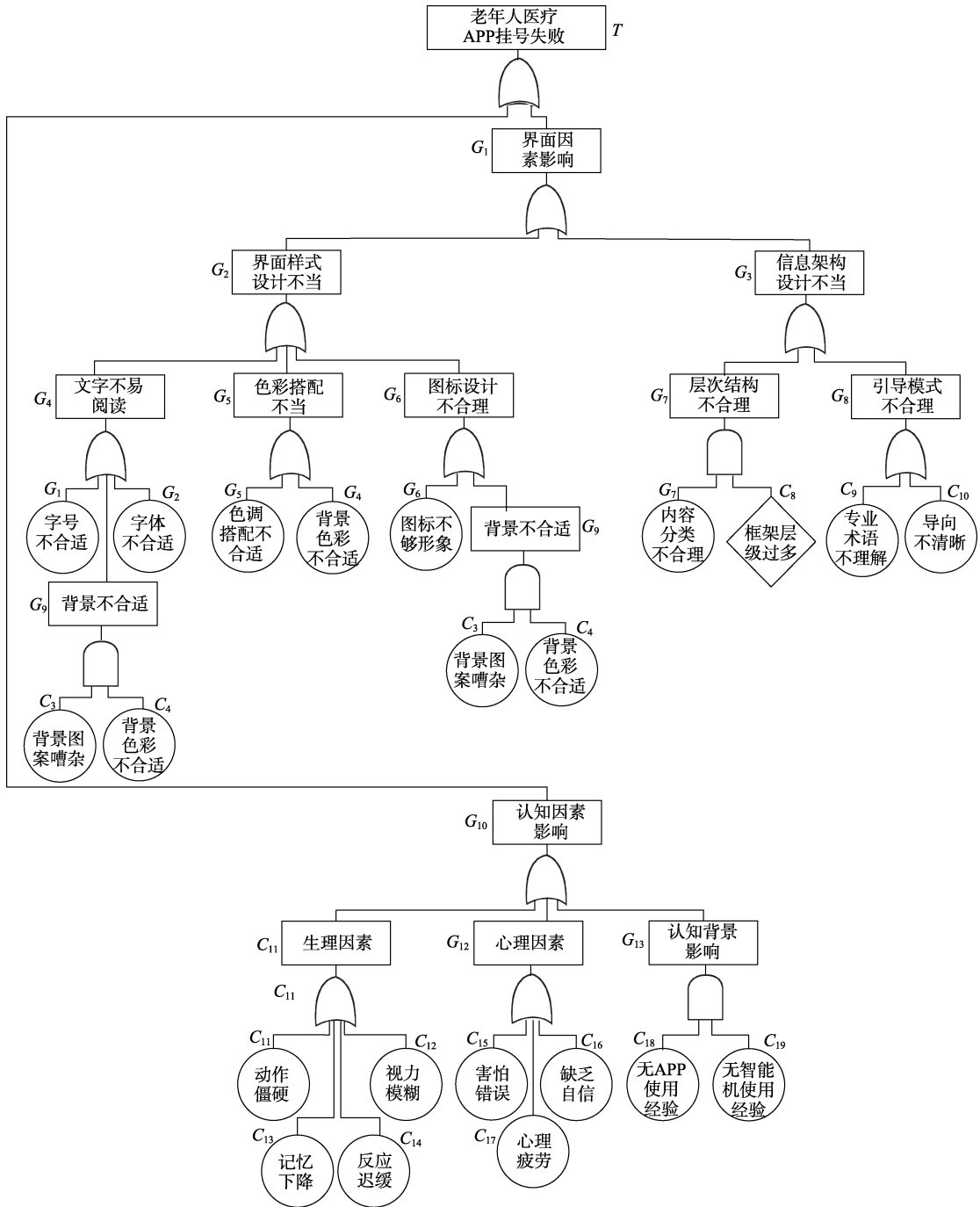


图 3 老年人医疗 APP 挂号失败故障树

Fig.3 Fault tree of medical APP registration failure for the elderly

3.2 故障树定性分析

故障树的定性分析应从头号事件开始,自下而上写出各事件的逻辑表达式,故障树定性分析最小切集计算见表 5,最后消除多余项,最终得到的基本事件为最小切集,即是导致头号事件发生的最小组合。

根据表 3 的逻辑关系进行分析计算,该故障树共有 8 个最小切集,由此发现,导致老年人医疗 APP 挂号失败的界面因素一共有 9 种基本事件,分别是 C₁ 字号不合适、C₂ 字体不合适、C₄ 背景色彩不合适、C₅ 导向不清晰、C₆ 图标不够形象、C₇ 内容分类不合理、C₈ 框架层级过多、C₉ 专业术语不理解、C₁₀ 导向不清晰,由于每一个基本事件的发生都会导致头号事件发生,所以它们都是最小切集,因此,在设计中应特别关注这些基本事件,故障树的定性分析可以迅速查找到导致头号事件发生的原因。例如字体不合适会降低老年人的易读性,导向不清晰不能让老年人方便快捷地找到所需功能。

表 5 故障树定性分析最小切集计算
Tab.5 The minimum cut sets calculation for qualitative analysis of fault tree

层数	逻辑关系计算
1	$T=G_1+G_{11}$
2	$G_1=G_2+G_3$
3	$G_2=G_4+G_5+G_6, G_3=G_7+G_8$
4	$G_4=C_1+C_2+G_9, G_5=C_4+C_5, G_6=C_6+G_9, G_7=C_7 \cdot C_8, G_8=C_9+C_{10}$
5	$G_9=C_3 \cdot C_4$

3.3 故障树定量分析

故障树定量分析的主要任务是得到老年人医疗 APP 挂号失败的概率,以及基本事件对头号事件的影响程度。通过对 50 名老年人的调查实验得到各个基本事件发生的概率,界面因素影响下各基本事件发生的概率见表 6,头号事件发生的概率为 96%,其中发生概率最大的因素是框架层级过多,其次是内容分类不合理,因此在设计用户界面时,应对信息进行合理分类并减少框架层级,提高老年人的易学性和使用效率。

表 6 界面因素影响下各基本事件发生的概率
Tab.6 Probability of occurrence of basic events under the influence of interface factors

主要因素	次要因素	次数	发生概率
文字不易阅读	C ₁ 字号大小不合适	7	0.14
	C ₂ 字体不合适	3	0.06
色彩搭配不当	C ₄ 背景色彩不合适	3	0.06
	C ₅ 色调搭配不合适	3	0.06
图标设计不合适	C ₆ 图标不够形象	4	0.08
层次分类不合适	C ₇ 内容分类不合理	9	0.18
	C ₈ 框架层级过多	12	0.24
引导模式不合理	C ₉ 术语不理解	4	0.08
	C ₁₀ 导向不清晰	5	0.10

3.4 构造重要度分析

为了更加有效地改善老年人医疗 APP,筛选出需要重点改善的基本事件,达到操作错误率显著降低的目的。例如字号大小不合适这项基本事件由失效转变为正常时,在故障树中基本事件恢复正常状态的数量会增多。故障树基本事件状态见表 7。

表 7 故障树基本事件状态
Tab.7 Basic event states of fault tree

基本事件状态									头号事件状态
C ₁	C ₂	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

每个基本事件的构造重要度值为:C₁ 字号大小不合适:15/128, C₂ 字体不合适:6/128, C₄ 背景色彩不合适: 8/128, C₅ 色调搭配不合适: 11/128, C₆ 图标不够形象: 12/128, C₇ 内容分类不合理: 16/128, C₈ 框架层级过多: 28/128, C₉ 术语不理解: 22/128, C₁₀ 导向不清晰: 10/128, 因此各个基本事件的构造重要度值由大到小顺序为: C₈>C₉>C₇>C₁>C₆>C₁₀>C₆>C₅>C₄>C₂。在改良时考虑影响因素的构造重要度进行改良,衡量好基本事件中的冲突成分,例如在减少了框

架层级的同时,会导致引导模式变得不清晰,因此更应考虑它对用户的重要程度。

3.5 设计改良

本次改良针对“智慧医疗”中界面因素影响下出现的基本事件进行改良,根据表 6 中各基本事件发生的概率得到的构造重要度的排序进行合理设计。从老年人生理角度上考虑,老年人视力模糊、反应迟缓,主要体现在 C₁ 字号大小不合适、C₂ 字体不合适、C₈

框架层级过多、 C_{10} 导向不清晰、 C_7 内容分类不合理。从心理角度上考虑,老年人易产生心理疲劳,害怕错误发生,主要体现在 C_4 背景色彩不合适、 C_5 色调搭配不合适、 C_6 图标不够形象、 C_9 专业术语不理解,因此,在设计改良过程中,应充分根据构造重要度值的优先顺序进行改良。

针对失效原因 C_1 字号大小不合适、 C_2 字体不合适,字体采用了微软雅黑,并且字号有所增大,与宋体字相比更加清晰,医疗 APP 部分界面改良见图 4 (b)。针对 C_4 背景色彩不合适、使用过多的色彩搭配,过多的色彩搭配增加视觉复杂度。针对失效原因

C_7 内容分类不合理、 C_8 框架层级过多,采用较少的引导步骤,避免较多的页面切换,以免令老年人造成困惑。针对 C_9 专业术语不理解,去除了医学专业术语。针对失效原因 C_6 图标不够形象,在首页及科室列表界面中丰富了图标的形象化,避免全部采用文字形式,提高老年人操作舒适感,医疗 APP 部分界面改良见图 4 (a)。针对失效原因 C_{10} 导向不清晰,对确定预约挂号和挂号成功增加了反馈提示信息,并且反馈提示采用了卡通形象,增加了界面友好感,有利于消除老年人心理疲劳,医疗 APP 部分界面改良见图 4 (d)。



图4 医疗 APP 部分界面改良

Fig.4 Part of the improved interface to the medical APP

3.6 结果验证

针对改良前后两种界面再次邀请老年人进行实验对比,统计被试者的出错百分比,改良前后不同界面下的出错率见图 5。由此发现改良后的页面在操作时发生的错误率明显低于改良前,说明重新设计的医疗 APP 界面的界面样式、引导模式、提示反馈调等都符合老年人的需求。

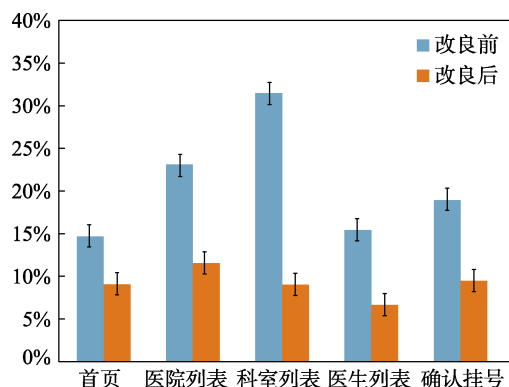


图5 改良前后不同界面下的出错率

Fig.5 Error rate under different interfaces before and after improvement

4 结语

在老年人 APP 设计过程中应着重考虑老年人的特殊原因,这有助于降低老年人的操作错误率。故障树分析法帮助设计师找到了影响老年人操作的根本原因,降低了老年人的操作障碍,提高了老年人对 APP 产品界面的满意度。研究结果可以对 APP 产品进行根本性的操作错误原因排除,推动以人为中心的设计。后续研究将会对基本事件之间的冲突成分进行深入研究,更全面地发挥 FTA 在交互设计领域中的运用。

参考文献:

- [1] 翟振武, 陈佳鞠, 李龙. 2015-2100 年中国人口与老龄化变动趋势[J]. 人口研究, 2017, 41(4): 60-71.
ZHAI Zhen-wu, CHEN Jia-ju, LI Long. Future Trends of China's Population and Aging: 2015-2100[J]. Population Research, 2017, 41(4): 60-71.
- [2] PICKING R, ROBINET A, GROUT V. A Case Study Using a Methodological Approach to Developing User

- Interfaces for Elderly and Disabled People[J]. The Computer Journal, 2010, 53(6): 842-859.
- [3] 许若飞, 李永锋. 基于 FMEA 的老年人电子产品交互设计研究[J]. 包装工程, 2017, 38(20): 222-227.
XU Ruo-fei, LI Yong-feng. Interaction Design of the Electronic Product for the Elderly Based on Failure Mode and Effects Analysis[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(20): 222-227.
- [4] 姚江, 封冰. 体验视角下老年人信息产品的界面交互设计研究[J]. 包装工程, 2015, 36(2): 67-71.
YAO Jiang, FENG Bing. Interface Interactive Design of Information Products for the Elderly from the Perspective of Experience[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(2): 67-71.
- [5] 金微瑕. SHERPA 方法在网站可用性评估中的有效性研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2014.
JIN Wei-xia. The Research on the Effectiveness of SHERPA Method in the Evaluation of Website Usability-Illustrated by the Case of Train Tickets Booking Site[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2014.
- [6] 加瑞特. 用户体验要素: 以用户为中心的产品设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
JAMES Garrett. The Elements of User Experience: User-Centered Design for the Web and Beyond[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [7] RUIJTERS E, STOELINGA M. Fault Tree Analysis: A Survey of the State-of-the-art in Modeling, Analysis and Tools[J]. Computer Science Review, 2015(3): 29-32.
- [8] 弗兰克.E.里特. 以用户为中心的系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
FRANK. E. Ritter. Foundations for Designing User-Centered Systems[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [9] YANG J, HUANG H, LIU Y. Evidential Networks for Fault Tree Analysis with Imprecise Knowledge[J]. Int. J. Turbo Jet-Engines, 2012, 29(2): 111-122.
- [10] 张根保, 范秀君, 张恒. 基于集对分析理论的复杂机电产品故障树分析[J]. 机械设计, 2014, 31(1): 8-11.
ZHANG Gen-bao, FAN Xiu-jun, ZHANG Heng. Fault Tree Analysis of Complicated Electromechanical Products Based on Set Pair Analysis Theory[J]. Journal of Machine Design, 2014, 31(1): 8-11.
- [11] 刘家琨. 工业安全性设计中的故障树分析方法介绍[J]. 信息科技, 2012(18): 212-241.
LIU Jia-kun. Introduction of Fault Tree Analysis Method in Industrial Safety Design[J]. Information Technology, 2012(18): 212-241.
- [12] HE S. Fault Detection Filter Design for a Class of Nonlinear Markovian Jumping Systems with Mode-dependent Time-varying Delays[J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 91(3): 1871-1884.
- [13] JIN L, PENG C, JIANG T. System-Level Electric Field Exposure Assessment by the Fault Tree Analysis[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(4): 1095-1102.
- [14] MAO C. System-Level Vulnerability Assessment for EME: From Fault Tree Analysis to Bayesian Networks-Part I: Methodology Framework[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58(1): 188-196.
- [15] 罗航, 王厚军, 黄建国. 故障树定量分析及其交互方式的实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(5): 473-480.
LUO Hang, WANG Hou-jun, HUANG Jian-guo. Quantitative Fault Tree Analysis and Its Realization of Interaction Mode[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2010, 24(5): 473-480.
- [16] 黄川, 王崑声. 一种基于结构重要度的故障树底事件排序算法[J]. 微计算机信息, 2011, 27(10): 134-136.
HUANG Chuan, WANG Kun-sheng. A Structure-based Algorithm of Basic Event Ordering for Fault Tree[J]. Microcomputer Information, 2011, 27(10): 134-136.
- [17] 刘胧, 刘虎沉. 运用 FMEA 的产品可用性评价方法[J]. 工业工程, 2010, 13(3): 47-50.
LIU Long, LIU Hu-chen. FMEA Based Product Usability Evaluation[J]. Industrial Engineering Journal, 2010, 13(3): 47-50.
- [18] TOM T, BILL A. 用户体验度量: 收集分析与呈现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
TOM T, BILL A. Measuring the User Experience: Collecting, Analyzing, and Presenting Usability Metrics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.