基于 FMEA 和 FTA 的老年人汽车人机界面交互设计研究

李永锋，陈则言
（江苏师范大学，徐州 221116）

摘要：目的 提升老年人汽车界面满意度，设计适合老年人使用的汽车界面。**方法** 提出基于失效模式与效应分析（FMEA）、故障树分析（FTA）的研究方法，首先成立会议小组进行 SHERPA 分析，绘制汽车界面层次任务分析图；随后运用 FMEA 找出汽车界面中的潜在失效模式，计算风险优先数值；接着选取风险优先数值高的失效模式，运用 FTA 寻找其发生的原因，对其以图形化表示；再对故障树进行定性定量分析，计算故障树的最小切集和失效事件发生概率，找到失效发生的核心因素；最后对失效事件进行改良并对改良后的结果进行验证。**结论** 以老年人汽车界面为例进行研究，该方法可以有效发现老年人操作汽车界面发生错误的原因，不仅可以帮助设计师找到改良的重点，还可以使老年人获得良好的驾驶体验。

关键词： 交互设计；失效模式与效应分析；故障树分析；汽车界面；老年人
中图分类号： TB472 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3563(2021)06-0098-08
DOI： 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.06.014

Research on Automobile Human Machine Interface Interaction Design of the Elderly Based on FMEA and FTA

LI Yong-feng, CHEN Ze-yan
(Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the satisfaction of automobile interface for the elderly, and design a suitable automobile interface for the elderly. A research method based on failure mode and effect analysis (FMEA) and fault tree analysis (FTA) was proposed. Firstly, an expert group was set up to carry out SHERPA analysis and draw the hierarchical task analysis diagram of automobile interface. Then, the potential failure mode of automobile interface was found by FMEA and the risk priority value was calculated. Then, the failure mode with the highest risk priority value was selected and the cause of the failure was found by FTA. Graphical representation of failure causes and qualitative and quantitative analysis of fault tree were carried out. The minimum cut set of fault tree and the probability of failure events were calculated to find the core factors of failure occurrence. Finally, the failure events were improved and the improved results were verified. Taking the automobile interface for the elderly as an example, this method can find out the reasons for the errors of automobile interface operation of the elderly efficiently. It can not only help designers find the focus of improvement, but also enable the elderly to get a better driving experience.

KEY WORDS: interaction; failure mode and effect analysis; fault tree analysis; automobile interface; the elderly

随着汽车产业的快速发展，汽车交互界面已经成为影响驾驶员驾驶体验的重要因素。近年来，老年人口数量不断上涨、老年驾驶员逐渐增多[1-2]，越来越多的老年驾驶员开始使用汽车界面。然而，目前市场上大多数汽车界面不能满足老年用户的需求，由于交互界面复杂、信息种类繁多，老年人因其特殊的生理、

收稿日期： 2021-01-03
基金项目： 江苏省高校哲学社会科学研究项目（2019SJA0930）；江苏师范大学研究生质量工程项目（Y2018YXK0305）；江苏师范大学博士学位教师科研支持项目（18XWRX031）
作者简介： 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。

心理，在使用时会产生比年轻人更多的错误。导致老年人操作错误的因素有很多，设计师凭设计经验难以从根本上解决，因此，需要寻找合适的方法来减少老年人的错误操作，提升老年人使用汽车界面的满意度，加强易用性。

目前对老年人汽车界面交互设计的研究主要分为两类：一类是从交互行为的角度出发，分析老年人与汽车界面的交互特征，如谭浩等分别通过不同方法对汽车界面进行分析，提出了通过周边交互设计来减轻驾驶员注意力负担的观点，为用户带来更好的驾驶体验[3-6]。另一类是从整体的角度综合考虑老年人汽车界面的交互水平，总结出老年人汽车界面的设计原则，如张会霞等从界面的样式、布局、信息架构、色彩等方面提出了优化设计原则[7-9]。综上所述，现有的研究大多从界面设计本身进行分析，未对老年人操作汽车界面错误问题的产生原因进行分析归纳，在设计改良时无法对错误原因进行根本性排除。因此，在设计改良时难以找到设计重点，存在单一性。

失效模式与效应分析（Failure Mode and Effects Analysis，FMEA）可以评估事件中不同的潜在失效模式，并明确各失效模式的风险指数，是一种发现风险的有效方法。故障树分析（Fault Tree Analysis，FTA）用图形表达的方式建立失效模式发生的原因和原因之间的层次关系，可以帮助设计师找到失效的最终原因。基于此，本文将 FMEA 和 FTA 相结合运用于老年人汽车界面交互设计，找出错误发生的原因，并采取针对性的改良措施，得出合理的解决方案。

1　理论背景

1.1　失效模式与效应分析

失效模式与效应分析最早是由美国国家宇航局使用的一套缺陷预防技术分析模式[10]，主要用于分析潜在的失效模式，采用自下而上的逻辑归纳，从确定故障模式开始到确定故障最终后果顺向分析的方法，在可靠性工程中已获得广泛应用，对提高产品的稳定性、安全性有着重要作用。如刘胧提出了基于 FMEA 的定量可用性评估方法，并以手机可用性评价为案例证明了该方法的有效性[11]。

1.2　故障树分析

故障树分析法是由华生和汉塞尔提出的，是一种确定故障原因和意外事件发生概率的解析方法，采用逻辑演绎的方法寻找故障原因，故障事件和故障原因之间使用特定的逻辑符号连接，表示故障的原因组合，分析故障树最底层的原因可以对故障进行排除[12]。分析结果可以用来指导可靠性和安全性设计，确定设计的重点内容。如苏凡囤运用故障树分析对轮式推土机液压系统进行分析，并以典型故障为例，找出了该故障发生的原因，验证了方法的有效性[13]。

2　研究方法

本研究提出基于 FMEA 和 FTA 的老年人汽车界面设计，对操作汽车界面发生错误的原因进行分析，从而达到优化设计的目的。其步骤主要包括：SHERPA（Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach）分析、FMEA 分析、FTA 分析、设计改良和结果验证，研究框架见图 1。

2.1　SHERPA 分析

为了了解用户在实施任务时的具体步骤，采用任务分析技术。SHERPA 主要用于分析任务中潜在的错误，其过程主要包括层次任务分析和差错分类[14-15]。

层次任务分析（Hierarchical Task Analysis，HTA）是对需要进行分析的任务作出层级表示。首先确定评估产品，成立老年人汽车界面专家小组。针对现有汽

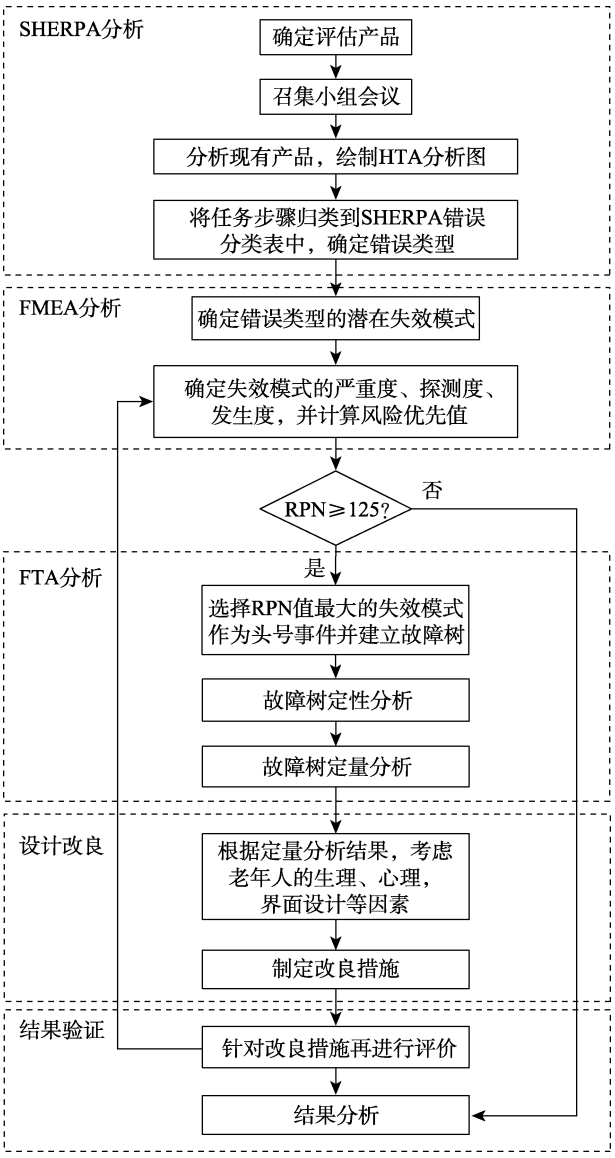

图 1　研究方法流程

Fig.1　Flow chart of research method

表 1 SHERPA 错误分类
Tab.1 SHERPA error classification

错误类型	编码	错误描述
动作	A1	操作过程太长/太短
	A2	操作不当
	A3	操作方向错误
	A4	操作太多/太少
	A5	操作位移/位偏
	A6	操作正确，对象错误
	A7	操作错误，对象正确
	A8	操作省略或遗漏
	A9	操作未完成
	A10	操作错误，对象错误
检查	C1	检查省略或遗漏
	C2	检查未完成，检查不完全
	C3	检查正确，对象错误
	C4	检查错误，对象正确
	C5	检查不适当
	C6	检查错误，对象错误
信息检索	R1	信息未获得，没有得到信息
	R2	得到错误的信息
	R3	信息检索不完全
信息交流	I1	信息未获得
	I2	传达错误的信息
	I3	信息不完全
选择	S1	漏选，选择省略
	S2	错选

车界面，展开所有子任务，绘制详细的 HTA 图，探讨现有汽车界面的主要任务是否适用于老年人。

在差错分类（Error classification）中，每种任务被分为 5 种错误类型，即动作、检查、信息检索、信息交流和选择。然后邀请被试按顺序对指定任务依次进行操作，记录其出错的任务，最后将出错的任务按照 SHERPA 错误分类表（见表 1）进行分类，确定其错误类型。

2.2 FMEA 分析

由于 FMEA 具有识别和评估风险的特点，因此在产品改良设计中广泛应用。通常 FMEA 按照以下两步进行[16]。

1）确定错误类型的潜在失效模式。根据 SHERPA 分析，确定任务的主要功能，对任务步骤进行全面分析，识别任务中的失效事件，确定与失效事件有关的潜在失效原因、潜在失效后果。

2）确定风险优先数值。风险优先数值（Risk Priority Number，RPN）是由严重度（Severity，S）、发生度（Occurrence，O）以及探测度（Detection，D）相乘得出，计算方法如式(1)：

$$RPN=S\times O\times D \tag{1}$$

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，进一步分析可能的事件
基本事件		代表系统中某一基本事件，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

其中，S 指对用户的影响程度；O 指失效模式发生的频率；D 指用户识别失效模式发生的能力；RPN 值用于对失效模式进行优先级排序，当 RPN 大于等于 125 时，必须通过改良以降低失效发生的概率[17]。

2.3 FTA 分析

故障树分析可以充分了解错误发生原因之间的相互关系，通常情况下按照如下 3 步进行故障树分析。

1）建立故障树。采用逻辑演绎法将错误发生的原因用图形化表示，首先选取 RPN 值最大的潜在失效后果作为头号事件放入顶部矩形框内，再分解为各类潜在的原因，例如导致老年人查找联系人困难的原因包括视觉样式设计不当、信息架构设计不当等，并置于故障树的下一层级，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。故障树中的图形符号见表 2[18]。

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[19]，最小切集是导致头号事件发生的最小组合方式，如果这个组合中的部件失效，故障事件就会发生，以此来分析老年人操作汽车界面发生错误的各种原因。

3）故障树定量分析。故障树定量分析的主要任务是计算每个基本事件发生的概率，对老年人操作汽车界面产生错误的原因作出定量评价。通过调研获得基本事件发生错误的次数，即可计算基本事件发生的概率，计算公式为“基本事件发生概率=基本事件错误发生次数/总人数”。

2.4 设计改良

根据 FMEA 和 FTA 相结合的分析结果，融入老年人群体，采用观察、访谈等方式，深入了解老年用户的行为、认知、社交等内容，了解老年驾驶员使用

汽车界面的感受、希望达到的目的，并结合老年人的生理、心理特点[20]，进行合理的设计改良。

2.5　结果验证

针对改良后的界面，让老年人对 S、O、D 参数再次进行评分，并建立改良后的汽车界面失效模式预防措施，直到 RPN 值小于 125[21]。在研究中，选择具有代表性的老年人对界面进行操作，并通过测试数据分析证明汽车界面的可行性。另外，还要对测试中发现的新问题进行分析，对界面进行进一步完善。

3　案例研究

随着年龄的增长，老年人的感知能力、动作协调性逐渐下降。设计合适的汽车界面能丰富老年人的驾驶活动。本研究基于 FMEA 和 FTA 的研究方法，依据尼尔森可用性测试原则[22]，邀请 6 位年龄在 60~65 周岁且具备长期驾驶经验的老年人作为被试，以大众途锐锐锋版汽车界面为例（见图 2）进行实验。本次实验选用的大众途锐锐锋版汽车界面是专门针对老年人进行设计的，具有一定的代表性。

3.1　SHERPA 分析

本研究由 9 位成员组成老年人汽车界面专家小组（6 名老年人、1 名交互设计师、1 名汽车教练、1 名交警），针对现有的汽车界面绘制 HTA 任务分析图，主要任务有音乐功能、导航功能、电话功能、收音机功能和空调功能，见图 3。由于电话功能使用频率较高，因此，本研究主要针对电话功能进行分析，其 HTA 任务分析见图 4。

a

b

图 2　大众途锐锐锋版部分实验界面
Fig.2　Some experimental interfaces of Volkswagen Touareg (Ruifeng)

根据层次任务分析，邀请老年人对电话功能的任务按照顺序进行操作。记录实验中老年人发生的错误，根据 SHERPA 错误分类表（见表 1）对错误进行分类。

3.2　FMEA 分析

1）确定错误类型的潜在失效模式。根据错误分类结果，共产生 6 种错误类型，分别是：I2、R1、C3、A8、I1、A9、A2。根据错误类型确定潜在失效模式，分析潜在失效模式产生的潜在失效后果、潜在失效原因。

2）确定失效模式的严重度、发生度、探测度数值，并计算风险优先数值。利用问卷调查的方法向老年人搜集严重度、发生度、探测度数值，根据式(1)计算风险优先数值，然后依据 RPN 值对失效模式进

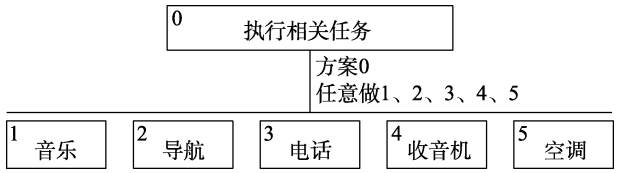

图 3　汽车界面主要任务分析
Fig.3　Main task analysis of automobile interface

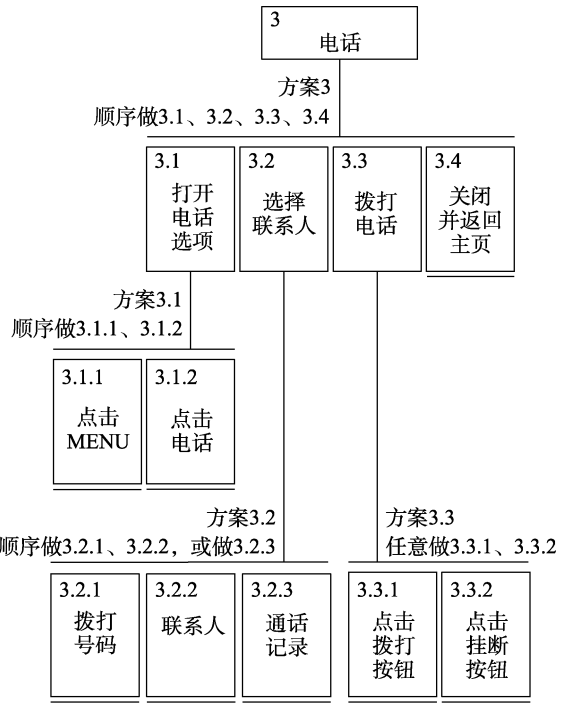

图 4　电话功能层次任务分析
Fig.4　Hierarchical task analysis for telephone function

行排序（见表 3）。由此发现，大于 125 的错误类型有 R1、A2、A9，其中 R1 的 RPN 值最大，因此需要对错误类型 R1 的失效模式进行深入分析，针对其余两种错误类型则直接对潜在失效原因进行改良。

3.3 FTA 分析

故障树分析可以充分了解老年人汽车界面潜在失效模式发生的原因及各原因之间的相互关系，通常情况下按照如下 3 步进行故障树分析。

1）建立故障树。建立老年人汽车界面电话功能故障树应充分了解老年人操作时发生的错误。本研究中 RPN 值最大的失效模式是老年人找不到电话簿，产生的潜在失效后果是老年人查找联系人困难，因此将老年人查找联系人困难作为故障树的头号事件，并分析头号事件的发生原因以及各原因之间的相互关系，如对于引起老年人查找联系人困难的原因可分为视觉样式设计不当、信息架构设计不当等，而视觉样式设计不当可以得出文字使用不合理、图标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。完成查找后将各事件用逻辑符号相连，老年人汽车界面电话功能故障树见图 5。

表 3 汽车界面电话功能失效模式分析

Tab.3 Analysis of failure modes of automobile interface telephone function

任务步骤	错误类型	潜在失效模式	潜在失效后果	严重度 S	潜在失效原因	发生度 O	探测度 D	RPN
3.2.2	R1	找不到电话簿	老年人查找联系人困难	7	设计不合理	8	3	168
3.2.1	A2	不明白英文缩写	导致误操作	7	未考虑老年人受教育程度	7	3	147
3.2.1	A9	老年人输入错误电话号码	影响后续操作	7	缺乏适当说明	5	4	140
3.1.2	I2	找不到电话功能通道	无法操作下一步	6	页面布局不当	3	3	54
3.4.1	A8	未挂断电话就返回主界面	造成老年人困惑	2	缺乏提示	6	4	48
3.2.3	C3	找不到通话记录	造成老年人急躁	3	图标语义不明确	3	4	36

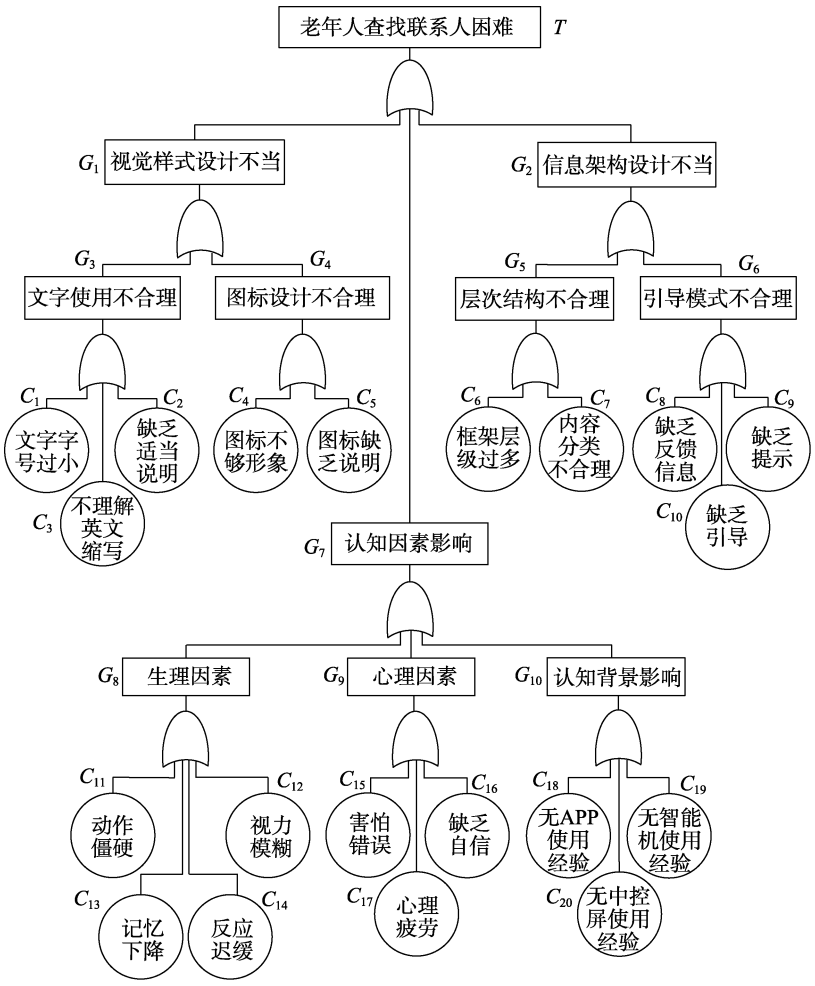

图 5 老年人汽车界面电话功能故障树

Fig.5 Fault tree of telephone function of automobile interface for the elderly

2）故障树定性分析。从图 5 故障树可知，任何一个基本事件的发生均会导致头号事件发生，因此，20 种基本事件均为最小切集。在设计中应充分考虑认知因素影响下的基本事件，改善视觉样式和信息架构设计影响下的基本事件，避免失效模式发生。例如老年人视力模糊，字号过小的文字会降低老年人的易读性；记忆下降无法记住框架层级过多的操作步骤等。

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查找联系人困难的各基本事件发生概率，发现基本事件对头号事件的影响程度。本次邀请 50 名老年人，通过调查并根据“基本事件发生概率=基本事件错误发生次数/总人数”计算各个基本事件发生的概率（见表 4）。其中发生概率最大的因素是内容分类不合理，其次是图标不够形象、框架层级过多，因此在设计用户界面时，应着重考虑这些因素，提高老年人的易学性和使用效率。

3.4　设计改良

本次改良结合表 4 中基本事件发生的概率，针对基本事件 C_1~C_{10} 进行改良。从老年人生理角度上考虑，C_{12} 视力模糊、C_{14} 反应迟缓主要体现在 C_1 文字字号大小不合适、C_2 字体不合适、C_7 内容分类不合理。从心理角度上考虑，C_{13} 记忆力衰退、C_{15} 害怕错误、C_{17} 心理疲劳主要体现在 C_3 不理解英文缩写、C_4 图标不够形象、C_5 图标缺乏说明、C_6 框架层级过多、C_8 缺乏反馈信息、C_9 缺乏提示。从认知背景角度上考虑，C_{20} 无中控屏使用经验，主要体现在 C_{10} 缺乏引导。在设计改良过程中，应充分考虑老年人的特点并结合基本事件发生的概率进行改良，部分汽车界面改良效果见图 6。

针对失效原因“C_1 文字字号大小不合适”、“C_2 字体不合适”，有以下解决方法：界面中文字以较大

表 4　基本事件发生的概率

Tab.4　Probability of occurrence of basic events

主要因素	次要因素	次数	发生概率
文字使用不合适	C_1 文字字号不合适	3	0.06
	C_2 字体不合适	3	0.06
	C_3 不理解英文缩写	4	0.08
图标设计不合适	C_4 图标不够形象	9	0.18
	C_5 图标缺乏说明	3	0.06
层次分类不合适	C_6 框架层级过多	8	0.16
	C_7 内容分类不合理	12	0.24
引导模式不合理	C_8 缺乏反馈信息	4	0.08
	C_9 缺乏提示	2	0.04
	C_{10} 缺乏引导	2	0.04

a　　b

c　　d

图 6　部分汽车界面改良设计

Fig.6　Improved design for partial automobile interfaces

表 5 汽车界面的失效模式预防措施结果

Tab.5 The results for preventive measures of failure modes of automobile interfaces

任务步骤	潜在失效模式	预防措施	措施结果			
			S	O	D	RPN
3.1.2	I2	重新设计拨号界面，考虑老年人的认读能力	6	4	2	48
3.2.2	R1	优先引导老年人使用语音查找联系人	5	4	4	80
3.2.3	C3	增加图标辨识度，适当增加说明	5	3	2	30
3.4.1	A8	增加反馈提示	6	2	3	36
3.2.1	A9	优先引导老年人使用语音输入	5	4	2	40
3.2.1	A2	删除英文缩写，增加文字说明	5	5	3	75

的字号呈现，字体采用微软雅黑，微软雅黑字体笔画有所加粗，与宋体字相比更加清晰；文字颜色与背景色形成对比，提高易读性。针对失效原因“C_7 内容分类不合理”，有以下解决方法：对信息按需求进行分类，将电话、导航、音乐等常用功能放在同一页面上，隐藏不常用的功能，且始终保留左侧导航栏，确保老年人在需要时可以随时切换；对于正在使用的功能，图标采用不同的颜色进行区分，见图 6a。针对失效原因“C_3 不理解英文缩写”，有以下解决方法：删除原有英文缩写表示方式，增加文字说明。针对失效原因“C_4 图标不够形象、C_5 图标缺乏说明”，有以下解决方法：在页面中对图标进行形象化处理，采用扁平化图标，使用少量的颜色和阴影，使图标具有示意性，并加上相应的文字说明，提高老年人的识别程度。针对失效原因“C_6 框架层级过多”，有以下解决方法：首先采用较少的操作步骤，优先引导老年人采用语音方式查找联系人，见图 6b；其次对通讯录列表作出优化，改变原来按照姓氏首字母排序的方式，采用人际关系的分类进行排序，见图 6c。针对失效原因“C_8 缺乏反馈、C_9 缺乏提示”，有以下解决方法：在页面中增加提示反馈信息，提示语言简洁友好；在通话等待页面中增加动画效果，有利于消除老年人心理疲劳感，见图 6d。针对失效原因“C_{10} 缺乏引导”，有以下解决方法：在关键步骤处增加引导，减轻老年人记忆负担，方便缺乏操作经验的老年人使用。

3.5 结果验证

再次邀请参与实验的 6 位老年人对改良后的设计方案进行实验，再次对 S、O、D 数值进行评分，并计算 RPN 值，发现所有潜在失效模式的 RPN 值均小于 125，证明改良有效。改良后汽车界面失效模式预防措施结果见表 5。

4 结语

本研究将 FMEA 和 FTA 相结合应用于老年人汽车界面，有助于降低老年人错误率。失效模式与效应分析可以帮助设计师找到老年人操作错误的原因；故障树分析可以对原因进行归纳总结，找出各原因之间的关系，有利于找到设计改良的重点，提升老年人对汽车界面的满意度，加强易用性。后续研究将会针对不同生活背景的老年人进行研究，更全面地发挥 FMEA 和 FTA 在交互设计领域中的作用。

参考文献：

[1] 曹霞，邢泽宇，张路蓬. 政府规制下新能源汽车产业发展的演化博弈分析[J]. 管理评论, 2018, 30(9): 82-96.
CAO Xia, XING Ze-yu, ZHANG Lu-peng. An Evolutionary Game Analysis of New Energy Vehicle Industry Development under Government Regulations[J]. Management Review, 2018, 30(9): 82-96.

[2] 伊兰. 老年驾驶员驾驶能力评价研究进展[J]. 中国老年学, 2013, 33(6): 1477-1479.
YI Lan. Research Progress in the Evaluation of Driving Ability of Elderly Drivers[J]. Chinese Journal Gerontology, 2013, 33(6): 1477-1479.

[3] 谭浩，赵颖. 智能汽车的车内周边交互体验研究[J]. 包装工程, 2018, 39(16): 1-4.
TAN Hao, ZHAO Ying. Peripheral Interactive Experience in Intelligent Vehicle[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(16): 1-4.

[4] 李霖，贺锦鹏，刘卫国. 先进驾驶辅助系统人机交互界面评价方法研究[J]. 汽车技术, 2014(2): 58-62.
LI Lin, HE Jin-peng, LIU Wei-guo. Evaluation Method Study of Human-machine-interface of Advanced Driver Assistance Systems[J]. Automobile Technology, 2014(2): 58-62.

[5] 张卫华，谷锦彪，冯忠祥. 汽车老年驾驶人特性及行为研究进展[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(7): 23-28.
ZHANG Wei-hua, GU Jin-biao, FENG Zhong-xiang. Advances in Researches on Driving Characteristics and Behavior of Older Drivers[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(7): 23-28.

[6] 谭浩，张文泉，赵江洪. 汽车交互界面视觉信息显示设计研究[J]. 装饰, 2012(9): 106-108.
TAN Hao, ZHANG Wen-quan, ZHAO Jiang-hong. Automobile User Interface Visual Information Display Design Research[J]. Zhuangshi, 2012(9): 106-108.

[7] 张会霞. 老年人数字通讯产品需求分析与设计研究[J]. 现代电子技术, 2016, 39(11): 129-132.

ZHANG Hui-xia. Demand Analysis and Design of Digital Communication Products for Elderly People[J]. Modern Electronics Technique, 2016, 39(11): 129-132.

[8] 李晶, 薛澄岐. 基于视觉感知分层的数字界面颜色编码研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 201-208.
LI Jing, XUE Cheng-qi. Color Encoding Research of Digital Display Interface Based on the Visual Perceptual Layering[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 201-208.

[9] 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.

[10] SCHMITTNER C, GRUBER T, PUSCHNER P, et al. Security Application of Failure Mode and Effect Analysis[J]. Yearbook of Institute of Economic Researches, 2014, 8666(18): 310-325.

[11] 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.

[12] YANG J, HUANG H Z, LIU Y. Evidential Networks for Fault Tree Analysis with Imprecise Knowledge[J]. Int. J. Turbo Jet-Engines, 2012, 29(2): 111-122.

[13] 苏凡囤, 袁博, 张琦, 等. 基于 FTA 的轮式推土机液压系统故障模式研究[J]. 中国工程机械学报, 2012, 10(1): 105-111.
SU Fan-tun, YUAN Bo, ZHANG Qi, et al. FTA-based Fault Mode Research on Hydraulic System of Wheel Bulldozers[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2012, 10(1): 105-111.

[14] KERMANI A, MAZLOUMI A, KAZEMI Z. Using SHERPA Technique to Analyze Errors of Health Care Staff Working in Emergency Ward of Amiralmomenin Hospital, Semnan[J]. Iran Occupational Health, 2015, 12(2): 13-23.

[15] RHONDA L, NEVILLE A S, HARRISON D. Applying Hierarchical Task Analysis to Medication Administration Errors[J]. Applied Ergonomics, 2005, 37(5): 669-679.

[16] BROGGI S, CANTONE M C, CHIARA A, et al. Application of Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) to Pretreatment Phases in Tomotherapy[J]. Journal of Applied Clinical Medical Physics, 2013, 14(5): 265-277.

[17] SCHNEIDER H. Failure Mode and Effect Analysis: FMEA From Theory to Execution[J]. Technometrics, 1996, 38(1): 80-85.

[18] 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, 16(3): 29-62.

[19] MENDEZ G L C, AMBROSIO L R, IVAN R B, et al. Failure Mode and Effects Analysis of Power Quality Issues and Their Influence in the Reliability of Electronic Products[J]. Electrical Engineering, 2016, 99(1): 1-13.

[20] NORMAN D A. The Design of Everyday Things. Revised and Expanded Edition[M]. New York: Basic Books, 2013.

[21] STAMATIS D H. Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution[M]. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2003.

[22] NIELSEN J. Usability Engineering[M]. Boston: Academic Press, 1993.