

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.03.011

某轻型装甲车辆乘员舱人机工效指标体系构建

黄晨旭, 檀虎, 李鹏, 陈晨, 刘文逸

(西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099)

摘要: 针对目前轻型装甲车辆乘员舱人机工效评价多为针对单一指标进行工效评价, 无相应综合评估方法的问题, 本文结合人机工效标准和专家意见, 从显示、控制、自动化、环境、告警和乘员舱综合共六个方面 61 个指标建立了初步的指标体系, 通过改进的德尔菲法对指标体系进行指标筛选, 最终筛选得出 35 个指标, 通过为传统序关系法添加反馈的方式对序关系法进行了改进, 使用改进的序关系法为指标赋予了权重, 建立了某轻型装甲车辆乘员舱人机工效指标体系。该指标体系中各指标的影响程度及指标权重可为轻型装甲车辆乘员舱人机工效设计提供参考。

关键词: 轻型装甲车辆; 乘员舱; 人机工效; 指标体系; 改进的德尔菲法; 改进的序关系法
中图分类号: TJ810.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2022)03-0402-08

Building of ergonomics index system for light armored vehicles(LAVs) crew cabin

HUANG Chenxu, TAN Hu, LI Peng, CHEN Chen, LIU Wenyi

(Northwest Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Xianyang 712099, China)

Abstract: The evaluation of ergonomics of LAVs is mostly the evaluation of single factor and has no integrated assessment. Aimed at that problem, we have referenced criteria and expert advice and built an initial index system with 61 indexes from six aspects: display, control, automation, environment, warnings, and crew cabin integrated. By the modified Delphi-method, 35 indexes are selected to build the index system. Feedback mechanism is led into the G1 method. According to the modified G1 method, the weight of indexes is given. This index system can provide guidance for ergonomics design of LAVs crew cabin.

Key words: light armored vehicles(LAVs); crew cabin; ergonomics; index system; modified Delphi-method; modified G1 method

轻型装甲车辆作为轻型高机动作战装备的主要组成部分, 主要装备于执行紧急机动作战的轻型部队, 用于执行遂行快速突击、纵身夺要、机动支援、反恐维稳等作战任务。相较于传统中型、重型的轮式、履带式底盘, 其具有重量轻、机动性高的优势。但轻型装甲车辆内部乘员空间往往相较于轮式、履带式底盘小, 其乘员数量也相应较少。以某型装备为例, 轮式车辆底盘内乘员为 3 人, 包含驾驶员、车长和炮手, 共 3 个显控终端; 而轻型车辆底盘中乘员仅为 2 人, 包含驾驶员和车长共 2 个显控终端。在执行相同任务时, 后者乘员往往具有更大的工作负荷, 其操作效率对作战的影响更大。而伴随着轻型装甲车辆自动化与智能化进程, 对乘员工作负荷及操作效率

的影响主要来自于乘员舱。因此在进行车辆系统研制时应重点考虑人机工效相关设计。

然而在工程中笔者发现, 尽管目前有一系列的工效标准和设计准则, 但在乘员舱的设计过程中并不能对工效设计进行总体把握。乘员舱作为一个复杂的工作空间, 几乎涉及到了工效学研究的各个方面, 在其设计过程中, 明确哪些工效问题对于最终的方案有着更为显著的影响, 哪些问题在多学科优化权衡过程中可以妥协而不影响系统整体效能是设计的重中之重。另外, 在工程实际中, 乘员舱的设计是逐步细化的过程, 在每一个阶段都要确定当前的方案为最优方案, 需要一种量化的工具为各个阶段的驾驶舱方案评估提供数据支持。

收稿日期: 2021-09-28; 网络出版日期: 2022-04-02

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20220401.1700.002.html>

通信作者: 黄晨旭, 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向为人机工效设计与评估、电气总体技术。E-mail: 329132613@qq.com

目前针对乘员舱人机工效设计方面已经有了不少研究,其中王华亭(2013)^[1]等利用 JACK 建立了不同百分比人体模型对舱内设备进行了工效评估并进行了设计改进建议,Jiwen Sun(2020)^[2]通过研究温度、湿度、噪声和显示界面对人的影响,对自行高炮乘员舱进行了优化设计。傅斌贺(2019)^[3]等建立了装甲车辆信息系统的人机工效试验平台,能够针对乘员信息作业绩效进行全程测试。刘维平(2018)^[4]等研究了装甲车辆人机工效一体化仿真方法,基于模型仿真对乘员工作负荷进行了评估。闫金海(2020)^[5]等针对某特种车辆乘员舱内有害气体在不同乘员位置的浓度变化进行了测量。

从这些研究可以看出,其大多是针对某一工效学问题(如可达性、可视性、舒适性、工作负荷)进行分析和评估,没有针对乘员舱整体的工效评估进行研究。而装甲车辆乘员舱的人机工效设计是一个系统工程,对其进行的评估应属于多指标综合评估,而非针对各个指标顺次完成评估。因此,迫切需要一套实用的工效评估指标体系,用以指导乘员舱设计工作,缩短研制周期,提高工效设计质量。

为了对轻型装甲车辆人机工效的设计与综合评估提供支持,本文基于改进的德尔菲法,建立了适合轻型装甲车辆的人机工效指标体系,并基于传统序关系法提出增加反馈的改进的序关系法,为指标体系中各指标赋予了权重。

1 指标体系初步建立

在建立指标体系时,采用分层递阶法的结构,如图 1 所示。

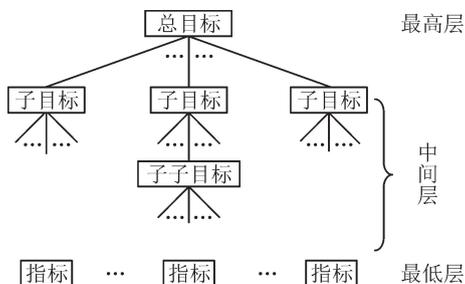


图 1 复杂对象系统综合评价指标体系结构

Fig. 1 Architecture of comprehensive evaluation index system for complex object system

依据设计特征不同,将轻型装甲车辆乘员舱人机工效设计这一总目标分为显示、控制、自动化、环境、告警、乘员舱综合,共 6 个子目标,用以架构某轻型装甲车辆乘员舱的综合评价指标体系。

1.1 显示

乘员在执行任务过程中所需进行的计划、决策

等活动需要来自系统的各种信息,显示界面作为乘员在乘员舱中获取信息的最重要方式,显示界面的设计直接决定乘员获取信息的效率。轻型装甲车辆乘员舱中的显示部件包括主显示器和其他显示仪表,其对比度、亮度、信息布局等指标均对乘员获取信息有重要影响。

1.2 控制

控制界面主要为乘员做出判断、决策后向系统输入信息的界面,控制界面的设计决定乘员的操作效率。轻型装甲车辆乘员舱内控制器主要分为手动操纵控制器和脚动操纵控制器,其操控的舒适度、操控反馈、布局等指标对乘员操作效率有重要影响。

1.3 自动化

随着轻型装甲车辆执行任务的逐渐复杂化及车辆智能化发展,不能也不应使乘员执行任务中的所有操作。自动化系统的好坏决定了乘员的工作负荷大小以及整个人机系统的运行效率,设计乘员舱自动化系统时,需要考虑人机功能分配的合适程度、自动化系统的可观测性以及自动化系统的可控性等指标。

1.4 环境

轻型装甲车辆乘员舱作为一个相对封闭的空间,其大小有限。对乘员造成影响的环境因素包括温度、湿度、振动(包括行驶中的振动及射击时产生的振动等)、噪声(包括稳态噪声及脉冲噪声)等,这些因素会对乘员的舒适性造成影响,有的甚至会影响乘员的操作效率。在进行乘员舱人机工效设计时,为达到预期设计的乘员操作绩效,乘员舱环境因素是需要着重考量的部分。

1.5 告警

告警是系统对当前故障、危险等的警示。告警系统设计优劣将决定在系统失效或发生危险时乘员对失效或危险的认知情况。好的告警系统设计能够在系统失效或发生危险时使乘员及时观察到系统状态和危险情况,但又不至于因告警信号而过度降低对其他重要信息的获取。告警系统设计时应考虑的指标包括告警信号的密度、区分度、清晰度等。

1.6 乘员舱综合

此外,还有一些无法分配到以上五点当中的其他指标或属于系统总体的相关指标,包括乘员舱外视界、标记标牌、间隙及空间分配等,将这些指标列入乘员舱综合内,作为乘员舱人机工效设计中的总体指标加以考虑。

显示、控制、自动化、环境、告警与乘员舱整合相关的设计内容在多个标准中都有提及,在评价工效

设计的内容时,必须要满足相关标准^[6-11]。结合相关标准和专家意见,本文初步建立了一个多层的评价指标体系指标集。其中, O 表示指标体系的总目标层(乘员舱人机工效本身), $O_i(i=1,2,3,\dots)$ 表示

指标体系的目标层, O_{ij} 表示指标体系的1级子目标层, U_{ki} 表示指标体系分解到最后的指标层。本文初步建立的评价指标体系如表1所示,共61个指标,由于指标层指标数量过多,本文中不详细展开。

表1 评价指标集

Tab.1 Set of evaluation indexes

总目标层	目标层	1级子目标层	2级子目标层	指标层	
O:轻型装甲车辆 乘员舱人机工效 评价指数	O ₁ :显示	O ₁₁ :主显示器	O ₁₁₁	U ₁₁ :对比度	
		O ₁₂ :备用仪表显示	...	...
		O ₂₁ :手动操纵控制器			
	O ₂ :控制	O ₂₂ :脚操纵控制器	O ₂₁₁	O ₂₁₁	U ₂₁ :触觉反馈
		O ₃₁ :系统可控性	...	...	...
		O ₃₂ :系统可观测性			
	O ₃ :自动化	O ₃₃ :人机功能分配合适程度	O ₃₁₁	O ₃₁₁	U ₃₁ :自动化系统的逻辑可见性
		O ₄₁ :信号密度	...	...	...
		O ₄₂ :信号区分度			
	O ₄ :告警	O ₄₃ :信号清晰度			
		O ₅₁ :振动	O ₄₁₁	O ₄₁₁	U ₄₁ :告警信号密度
		O ₅₂ :照明	...	...	...
		O ₅₃ :微小气候			
	O ₅ :环境	O ₅₄ :内部色彩	O ₅₁₁	O ₅₁₁	U ₅₁ :照明颜色
		O ₆₁ :外视界	...	...	...
	O ₆ :乘员舱 综合	O ₆₂ :标记标牌	O ₆₁₁	O ₆₁₁	U ₆₁ :乘员舱入口空间
		O ₆₃ :间隙及空间分配	...	...	...

2 评价指标筛选方法

针对指标体系中各指标的筛选方法一般可概括为两类^[9]:一是主观筛选法,一般是领域内的专家对各个指标进行主观方面的评定;二是统计分析法。在无法获取足够的用于筛选指标的数据或指标体系的评价对象难以定量分析时,往往无法使用统计分析法进行指标分析,此时主要依据专家自身的经验来筛选指标体系中各项指标。

由于在轻型装甲车辆乘员舱的人机工效评价中,有很多指标难以得到定量值,在实际的评价工作中,装甲车辆领域专家的经验知识起到了非常重要的作用。因此,为了从初步建立的评价指标中筛选出对工效设计影响较大的指标,本文采用了改进的德尔菲法筛选指标体系,此方法利用专家评定结果和比较判定对指标进行筛选,是目前指标筛选的典型方法,德尔菲法实施程序如图2所示。本文在采用改进德尔菲法建立轻型装甲车辆乘员舱人机工效指标体系时,主要分为以下几个步骤。

2.1 成立协调小组

在进行指标筛选之前,应首先成立协调小组,协调小组的主要作用是:邀请领域内合适的专家作为专家组成员,设计专家咨询问卷用以采集专家的指标筛选数据,组织咨询会议并对采集到的筛选数据进行统计分析处理。

2.2 确定需要进行咨询的领域内专家

专家的合适与否是决定最终指标体系的关键。在选择专家时,应当选择领域内具备专业知识和丰富工程经验的专家,同时,专家也应当对领域内的前沿发展具备一定程度的了解。

研究发现,随着专家人数的增多,获取到的专家评价信息也就越丰富。但由于人数的增加,各专家之间的意见分歧也就越明显,此时往往难以得到一个相对统一的专家意见。通常来说,对于人机工效方面的评估,专家组成员在4人至5人即可发现被评估对象的80%~85%的问题,而当专家组成员人数达到5~11人时,则能够得到相对准确的评估结果^[12]。因此本文选取10名轻型装甲车辆领域的专家进行咨询。

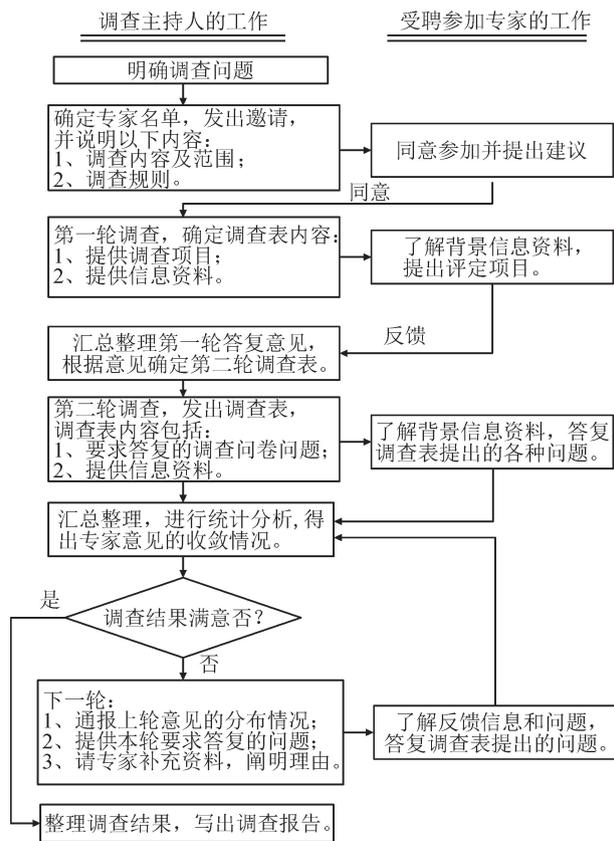


图2 德尔菲法实施程序

Fig. 2 Procedure for the implementation of Delphi Method

2.3 设计调查问卷并进行第一轮咨询

在对初步建立的评价指标进行专家咨询时,依据上述原则设计出第一轮调查问卷,样表如表2所示。在第一轮咨询中,首先介绍了本次咨询会议举行的背景和预期达到的目的,供与会的专家组成员进行参考。然后,发给各专家调查问卷,要求每位专家根据自身经验对指标体系中每个指标对轻型装甲车辆乘员舱人机工效设计的影响程度进行评估。其中影响程度等级采用 Likert 量表进行划分,1~5 分别表示的影响程度等级为“不大”、“一般”、“大”、“很大”和“极大”。在给出影响程度等级的同时,要求各位专家给出判定影响程度等级时的自信程度。自信程度同样采用 Likert 量表进行划分,1~5 分别表示自信程度为“很低”、“低”、“一般”、“高”和“很高”。

表2 显示器可读性(样表)

Tab. 2 Display readability(sample table)

指标名称	影响程度	判断自信度
对比度		
屏幕刷新率		
防眩光		
分辨率		
亮度		

2.4 对第一轮问卷结果进行分析并进行第二轮咨询

在对第一轮获取的问卷进行统计处理和分析后,将多数专家的意见反馈给每位专家,开始进行第二轮咨询。本文中“多数专家”指的是“专家人数的2/3”^[13]。在第二轮咨询中,要求每位专家根据第一轮问卷的分析结果对每个指标对轻型装甲车辆乘员舱工效设计的影响程度重新进行判断。指标体系第二轮调查问卷的样表如表3所示,其中“多数专家意见”指第一轮调查中多数专家的意见。

表3 第二轮调查表样表

Tab. 3 Sample table of the 2nd round of questionnaire

指标名称	影响程度	判断	认为影响程度≥4
		自信度	的专家所占比例
外视界			70%

2.5 依据最后一轮问卷结果筛选出最终指标体系

一般情况下,第一轮问卷获取的专家意见的分散程度较高,随着后续各轮的问卷调查,由于反馈结果的存在,各个专家的意见将趋于集中化,所有专家针对某一指标的意见将越来越精确。对改进德尔菲法,一般通过两轮问卷咨询后,各个专家针对某一指标的意见已经趋于一致。因此,将根据第二轮问卷的产生专家一致性意见来对指标体系进行筛选。专家一致性意见为在该指标自信度等级均值大于3的情况下,不少于2/3(或67%)的专家判断等级为“很大”或“很大”以上的判断结果,即 Likert 量表等级 ≥ 4 ^[14-15]。

3 指标相关参数计算

依据第二轮咨询结果计算各指标的平均相关指标参数。

3.1 指标对总体人机工效设计的影响程度

指标对总体人机工效设计的影响程度可用专家判断指标重要程度的平均值 \bar{E} 来表示。平均值 \bar{E} 越大,表示该指标对轻型装甲乘员舱人机工效设计的影响越大。

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (1)$$

其中, E_i 为第 i 个专家对该指标判断的重要程度, n 为专家总人数。

3.2 专家意见的离散程度

专家意见的离散程度用标准差 σ 表示, σ 越小,表示专家之间的意见越统一。

$$\sigma = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}{n - 1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

3.3 专家意见的协调程度

专家意见的协调程度用变易系数 CV 来表示, 该系数用来表征专家对某个特定指标评价的协调程度, 该值越小越协调。

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{E}} \quad (3)$$

3.4 专家的一致意见

专家的一致意见用 P_{33} 来表示, P_{33} 为专家判断等级的第 33 百分位数。

3.5 专家评价的有效性

使用专家组成员的平均自信程度来表征评价有效性, 当所有专家的自信程度均值在“一般”及以上时(即不小于 3), 此时评价结果更接近于主观中的真实情况。

3.6 专家意见分布情况

专家意见分布情况用 η 来表示, η 为认为该指标影响很大及以上(≥ 4)专家的人数所占专家总人数的百分比。

4 指标赋权

权重系数的确定是综合评估过程中关键的一个环节, 权重系数确定的合理性, 即是对评价指标与评价目标关系描述的准确性, 显然决定了综合评估结果的有效性。指标赋权方法可以分为两大类: 客观方法和主观方法。客观方法一般根据被评价对象结构或机理确定各指标权重。但是, 对于装甲车辆人机工效综合评估来说, 其各个指标之间的关系复杂, 各个指标对总体工效水平的影响机制尚不清楚, 而且工效评价受到评价者主观因素的影响很大, 这些原因使得权重系数的客观确定方法难以施行。因而一般情况下都是采用主观赋权法来确定指标权重, 即借助专家的经验判断获得权重系数。层次分析法和序关系法是常用的两种主观赋权方法。

由于层次分析法需要构造判断矩阵, 而且判断矩阵必须经过一致性检验, 在实际工作中, 特别是当同一层次的指标数过多时, 构造满足一致性要求的判断矩阵往往是非常困难的。当指标数多于 9 个时, 层次分析法往往不能得到准确的结果。为此, 东北大学的郭亚军教授对层次分析法进行了改进, 提出了一种不需要一致性检验的方法, 即序关系分析法(又称 G_1 -法)。该方法要求专家首先根据各评价指标对特定评价目的重要性从大到小定性排序, 然后估计相邻的前一个指标比后一个指标重要的程度, 在专家进行判断时, 这一程度值一般用定性语言描述, 在后续的数据处理中, 需要为每一个程度等级

赋予一个合适的数值, 然后经过简单的数学处理, 即可计算出各评价指标的权重值。

然而, 序关系法在实际应用中, 不同的工作环境、经历会对专家的知识、经验和偏好造成影响。而专家个人的知识水平、经验的多少以及偏好所具有的限制性, 使专家在给出判断时未必能进行全面而深入的考虑, 这样得到的专家主观数据可能并不能完全反映指标权重的客观真实情况。就序关系法中要求专家按指标重要性排序来说, 不同的专家可能给出完全相反的排序结果, 这样, 最终得到的专家群体给出的权重系数的可信度就大打折扣。因此需要针对传统序关系法进行改进, 降低专家因个人知识、经验和偏好对赋权结果造成的影响。

4.1 序关系法改进

在本文建立指标体系时所采用的改进的德尔菲法即为一种带反馈的专家咨询法, 其经过多轮反馈可使各专家的意见趋于一致。因此, 本文针对序关系法引入相应的反馈机制, 假设参与指标权重咨询的有 m 个专家, 首先按照一般序关系法的步骤, 对 n 个指标 $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 进行第一轮咨询, 这样, m 个专家将会给出 m 个指标排序和相邻指标间的相对重要性比值, 如下:

$$\begin{cases} u_{i1} > u_{i2} > \dots > u_{in} \\ (r_{i2}, r_{i3}, \dots, r_{in}) \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

其中, r 的赋值为 1.0、1.2、1.4、1.6、1.8, 分别代表同样重要、稍微重要、比较重要、非常重要、极其重要。

利用下面公式可求出指标集 $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 中各指标的权重系数。

$$\omega_n = \left(1 + \sum_{k=2}^n \prod_{i=k}^n r_i\right)^{-1} \\ \omega_{i-1} = r_i \omega_i, i = n, n-1, \dots, 2 \quad (5)$$

这样, 按照序关系方法就可以计算出第 i 个专家为 n 个指标 $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 赋予的权重系数 W_i 和重要性排名 K_i :

$$\begin{cases} W_i = (\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{in}) \\ K_i = (k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{in}) \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

式中, ω_{ij} 为第 i 个专家为 $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 中第 j 个指标的赋权结果, k_{ij} 为第 i 个专家对 $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 中第 j 个指标重要性排名, 显然 k_{ij} 为 $1 \sim n$ 之间的某一个整数, 且彼此不相等。

令第一轮每一位专家给出的权重向量 W_i 的平均值作为第一轮咨询结果的各指标最终权重向量, 即:

$$\mathbf{W} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mathbf{W}_i = \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m W_{i1}, \dots, \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m W_{in} \right) = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) \quad (7)$$

根据式中权重向量 \mathbf{W} 中各元素(各个指标权重)的大小,可以得到 n 个指标 u_1, u_2, \dots, u_n 在第一轮专家咨询中的最终排名 $\bar{\mathbf{K}}$:

$$\bar{\mathbf{K}} = (k_1, k_2, \dots, k_n) \quad (8)$$

在第二轮的专家咨询过程中,将 $\bar{\mathbf{K}}$ (即第一轮的平均排序结果)反馈给专家,要求专家在参考 $\bar{\mathbf{K}}$ 的基础上,再次对指标进行排序,并判断两两之间的相对重要性之比。如此,虽然第一轮专家的指标权重排序结果相差很大,经过多轮的反馈循环,专家的意见终将趋于一致。

4.2 排序一致性判据

排序一致性判断采用逆序数检验法。根据一轮专家调查的权值结果 $\mathbf{W} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$, 可以

得到 n 个指标 $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 的重要性排序 $u_1^* > u_2^* > \dots > u_n^*$, 记这时的指标重要性排序为标准排列 $(1, 2, \dots, n)$ 。对于第 i 个专家给出的排序 $u_{i1} > u_{i2} > \dots > u_{in}$, 它对应于一个 n 阶排列, 记其逆序数为 $\tau(i)$ 。对于 n 阶排列, 其最大逆序数为 $n(n-1)/2$ 。 m 个专家给出的 m 个排列的平均逆序数比也可用来表示排序偏差的程度, 记:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^m \tau(i)}{m(m-1)/2} \quad (9)$$

上述两种方式得到的参数 D 为平均排序偏差系数, 当 $D < 0.1$ 时, 认为专家对指标的重要性排序达到一致, 结束权重咨询。

5 结果分析

本文经过两轮专家意见计算得出了各指标的平均重要程度, 调查结果如表 4 所示(由于指标过多, 此处仅展示显示部分, 指标包括目标层)。

表 4 第二轮问卷调查结果汇总与统计分析(显示部分)

Tab. 4 Summary and statistical analysis of the result from the 2nd round of questionnaire (part of display)

指标	平均值	标准差	CV	P33	平均自信度	$\eta/\%$
显示	4.7	0.483	0.103	4.97	4.45	100.00
主显示器	5	0	0	5	4.64	100.00
其他仪表显示	3.8	0.632	0.166	3.97	4.27	70.00
显示器可读性	4.6	0.516	0.112	4	4.09	100.00
显示内容可读性	4.6	0.516	0.112	4	4.27	100.00
信息适用度	4.3	0.823	0.191	4	4.36	80.00
对比度	4.1	0.876	0.214	3.97	4.45	70.00
屏幕刷新率	3.7	1.059	0.286	3	3.82	50.00
防眩光	4.1	0.994	0.243	3	4.09	60.00
分辨率	4	1.054	0.264	3.97	4.36	70.00
亮度	3.7	0.949	0.256	3	3.82	60.00
信息位置	4.3	0.675	0.157	4	4.09	90.00
编码形式	3.9	0.876	0.225	3	4.00	60.00
信息密度	3.9	0.738	0.189	3.97	4.09	70.00
信息格式	3.8	0.919	0.242	3	4.09	50.00
信息更新频率与车辆状态的一致性	4.2	0.789	0.188	4	4.00	80.00
信息按照重要程度排布	4.1	0.876	0.214	3.97	4.09	70.00
信息明确性	4.2	0.789	0.188	4	4.00	80.00
编码一致性	4.3	0.675	0.157	4	4.18	90.00
编码信息量	3.8	0.789	0.208	4	4.09	80.00
编码识别效率	4.1	0.876	0.214	3.97	4.36	70.00

通过表4可以看出,各个指标的变异系数CV都较小,说明专家对各个指标的评价是一致的。另外,专家组对各个指标的平均自信度都大于3,表示咨询结果接近主观评价的真实情况。在第二轮的专家问卷调查过程中,也邀请专家对第一轮中部分专家所建议增加的指标进行了判断,判断结果见表5。

通过第二轮的调查结果统计,从所建立中的61个指标中选出了31个有效指标,这些指标都有超过2/3(67%)的专家认为影响“很大”或“很大”以上。除此之外,第一轮调查中,专家建议增加的操作力、噪声、座椅设计、三防设计指标,在第二轮的调查中有超过2/3的专家认为很重要,故应增加到指标体系中。因此,经过第二轮的调查评估,筛选出了35个工效指标。

另一方面,操纵舒适度、多种外界光照条件下可读等30个指标,认为其影响为“很大”或“很大”以上的专家数达不到专家总人数的2/3(67%),依据德尔菲法选择指标的标准,将其舍去。但是,专家对

这些指标的影响评定等级也都为“大”(=3),故在设计过程中也应给以考虑。

表5 专家建议增加的指标调查结果

Tab.5 Indexes recommended by experts

上一层级	指标	认为影响程度≥4的专家人数	占比/%
控制	操作力	10	100
控制器设计	控制器形状	5	50
控制器设计	控制器灵敏度	2	20
环境	噪声	10	100
乘员舱综合	座椅设计	10	100
乘员舱综合	三防设计	10	100

通过改进的序关系法,经过两轮问卷调查分析得到了35个指标分别在上一层级中的权重,其结果如表6所示(限于篇幅,此处仅展示目标层权重结果)。

计算排序偏差D,结果为 $0.022 < 0.1$,则认为专家对指标的重要性排序达到一致。

表6 目标层权重调查结果

Tab.6 Target layer weighting results

专家	序关系	相对重要程度					指标权重					
		r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6
1	$O_1 > O_2 > O_6 > O_3 > O_4 > O_5$	1.2	1.4	1.2	1.0	1.2	0.260 9	0.217 4	0.129 4	0.129 4	0.107 8	0.155 3
2	$O_1 > O_2 > O_3 > O_6 > O_4 > O_5$	1.2	1.2	1.0	1.0	1.2	0.222 5	0.185 4	0.154 5	0.154 5	0.128 7	0.154 5
3	$O_1 > O_2 > O_6 > O_3 > O_4 > O_5$	1.4	1.2	1.2	1.0	1.2	0.269 2	0.192 3	0.133 5	0.133 5	0.111 3	0.160 2
4	$O_1 > O_2 > O_6 > O_4 > O_3 > O_5$	1.2	1.0	1.2	1.2	1.0	0.221 3	0.184 4	0.128 1	0.153 7	0.128 1	0.184 4
5	$O_1 > O_2 > O_6 > O_3 > O_5 > O_4$	1.2	1.2	1.4	1.4	1.0	0.267 9	0.223 3	0.132 9	0.094 9	0.094 9	0.186 1
6	$O_2 > O_1 > O_6 > O_3 > O_4 > O_5$	1.0	1.4	1.2	1.0	1.0	0.222 2	0.222 2	0.132 3	0.132 3	0.132 3	0.158 7
7	$O_1 > O_2 > O_6 > O_3 > O_4 > O_5$	1.4	1.2	1.4	1.2	1.2	0.295 5	0.211 1	0.125 6	0.104 7	0.087 2	0.175 9
8	$O_1 > O_2 > O_3 > O_4 > O_6 > O_5$	1.2	1.0	1.2	1.0	1.0	0.210 5	0.175 4	0.175 4	0.146 2	0.146 2	0.146 2
9	$O_1 > O_2 > O_3 > O_6 > O_4 > O_5$	1.0	1.2	1.0	1.4	1.0	0.205 9	0.205 9	0.171 6	0.122 5	0.122 5	0.171 6
10	$O_1 > O_2 > O_4 > O_3 > O_6 > O_5$	1.2	1.4	1.0	1.2	1.2	0.254 2	0.211 9	0.151 3	0.151 3	0.105 1	0.126 1
归一化后平均							0.243 0	0.202 9	0.143 5	0.132 3	0.116 4	0.161 9

6 应用

本文根据筛选得到的指标体系制作了主观调查问卷,针对某轻型高机动装甲车辆的一体化显控终端进行了人机工效评估。该问卷要求评价人员对评价对象从显示、控制两方面对该一体化显控终端做出评价,此外,在每个子目标层下给出应改进的评价建议。

根据评估结果,该一体化显控终端存在的人机工效问题如表7所示。

表7 存在的人机工效问题

Tab.7 Existing ergonomic problems

指标	存在问题
防眩光	在户外条件下,阳光直射前挡风玻璃及右侧挡风玻璃时在屏幕上会产生眩光
触摸反馈	触摸屏上虚拟按键触摸时无相应触摸反馈
控制器防差错设计	显控终端上按键之间间距稍短,易发生误触
信息位置	由于显示屏幕相对于显控终端下凹,处于界面边缘的按键在触摸时难以操作

根据评估结果,该一体化显控终端应着手在防眩光、触摸反馈、控制器防差错设计和信息位置四方面进行改进。

然而由于一体化显示终端尺寸限制,若扩大按键之间的间距,将只能缩小屏幕尺寸,从而影响显示内容可读性。根据权重分析结果,控制器防差错设计在装甲车辆总体人机工效总的权重为 0.022,小于显示内容可读性的 0.088,故在控制器防差错设计改进时应慎重考虑扩大按键之间的间距。

7 结 语

本文针对目前轻型装甲车辆人机工效评价单一,无对应综合评估方法的问题,建立了针对某轻型装甲车辆乘员舱的人机工效指标体系。从 61 个初始指标中筛选出了 31 个有效指标,并参考专家意见,增加了操作力、噪声、座椅设计和三防设计 4 个指标,最终形成涵盖显示、控制、自动化、环境、告警和乘员舱综合六个方面共 35 个指标的人机工效指标体系。针对传统的序关系法进行改进,提出了改进的序关系法,能够降低专家因个人知识、经验和偏好的限制对赋权结果造成的影响。

本文建立的人机工效指标体系可作为人机工效综合评估的工具对轻型装甲车辆乘员舱进行人机工效评估。同样的,建立的人机工效指标体系中各指标的影响程度及其权重大小也可作为轻型装甲车辆乘员舱人机工效设计时的参考,针对影响程度较大的人机工效指标应当作为人机工效设计中的优先项进行优先考虑。

参考文献:

- [1] 王华亭,田宇,程广伟,等.基于 JACK 的某自行高炮乘员舱人机工效评估[J].火炮发射与控制学报,2013(2):63-66.
WANG Huating, TIAN Yu, CHENG Guangwei, et al. Ergonomics assessment of crew compartment in a self-propelled anti-aircraft gun based on JACK[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2013(2):63-66.
- [2] SUN J, HAO H, LI J, et al. Study on optimization design for man-machine combination of a self-propelled anti-aircraft gun vehicle (SODMMCSAGV) [C]//International Conference on Man-Machine-Environment System Engineering, 2020. Singapore, Springer, 2020: 973-979.
- [3] 傅斌贺,刘维平,刘西侠,等.装甲车辆信息系统人机工效试验平台设计与开发[J].兵工学报,2019,40(7):1537-1545.
FU Binhe, LIU Weiping, LIU Xixia, et al. Design and development of ergonomic test platform of armored vehicle information system [J]. Acta Armamentarii, 2019,40(7):1537-1545.
- [4] 刘维平,聂俊峰,刘西侠,等.装甲车辆人机工效一体化仿真方法研究[J].火力与指挥控制,2018,43(7):120-124,129.
LIU Weiping, NIE Junfeng, LIU Xixia, et al. Research on ergonomics integration simulation in armored vehicle [J]. Fire Control & Command Control, 2018,43(7):120-124,129.
- [5] 闫金海,韩卫敏,考希宾,等.某特种车辆陆地跑车舱室内有害气体测试与评价[J].人类工效学,2020,26(3):74-75.
- [6] 中航总 301 所,空军第四研究所,空军第八研究所,等.军事装备和设施的人机设计准则:GJB 2873—1997 [S].北京:总装备部军标发行部,1997.
- [7] 装甲兵工程学院.装甲车辆人-机-环境系统总体设计要 求:GJB 1835—1993 [S].北京:总装备部军标发行部,1993.
- [8] 中国航空工业第 301 所,中国标编所,空军第四研究所,等.军事装备和设施的人机工程设计手册:GJB/Z 131—2002 [S].北京:总装备部军标发行部,2002.
- [9] 中航总三〇一所,空四所,空八所,等.军事装备和设施的人机工程要求:GJB 3207—1998 [S].北京:总装备部军标发行部,1998.
- [10] 总装备部电子信息基础部标准化研究中心,中国人民解放军航天员科研训练中心,中国科学院心理研究所,等.人机工程实施指南:GJB/Z 134A—2012 [S].北京:总装备部军标发行部,2012.
- [11] 中国人民解放军总装备部装甲兵装备技术研究所,中国兵器工业计算机应用技术研究所.装甲车辆综合显控终端通用规范:GJB 6106—2007 [S].北京:总装备部军标发行部,2007.
- [12] 陈晓剑,梁梁.系统评价方法及应用[M].合肥:中国科技大学出版社,1993.
- [13] OSBORNE J, COLLINS S, RATCLIFFE M, et al. What “ideas-about-science” should be taught in school science? a delphi study of the expert community[J]. Journal of Research in Science Teaching, 2003, 40(7): 692-720.
- [14] 李银霞,刘曼曼,高俊杰.汽车人机工程综合评价指标体系研究[J].郑州大学学报(工学版),2014,35(5):96-99.
LI Yinxia, LIU Manman, GAO Junjie. Research on the comprehensive evaluation indexes system of vehicle ergonomics[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2014,35(5):96-99.
- [15] 宋海靖,胡毅,黄丙寅.民机驾驶舱显示界面人机工效模糊综合评价研究及应用[C]//探索 创新 交流——第六届中国航空学会青年科技论坛论文集(下册).北京:航空工业出版社,2014:333-339.