

基于多层次模糊理论的列车驾驶界面布局综合评价

饶东¹, 陈悦源², 吕文龙¹, 郎佳宁³

(1.北京市轨道交通建设管理有限公司, 北京 100068;

2.北京交通大学, 北京 100044; 3.北方华创微电子装备有限公司, 北京 100176)

摘要: **目的** 从人因工程学角度, 基于多层次模糊理论提出一种列车驾驶人机交互界面的评价方法。**方法** 针对当前地铁列车驾驶作业, 基于驾驶任务分析, 从能够直接反映舒适性的人体关节活动角度出发, 构建了列车驾驶界面综合评价的“任务—器件—动作”指标体系。基于多层次模糊理论构建用于评价列车人机交互驾驶界面布局的模型, 通过设计人因实验, 使用层次分析和模糊粗糙集法获取各层级指标权重, 展开对列车驾驶界面布局方案的综合量化评价。**结论** 以北京地铁全自动列车驾驶台布局为例, 使用该方法验证了综合评价模型的有效性和可行性, 能够为地铁列车驾驶界面前期的布局设计阶段提供理论与实践指导。

关键词: 人机界面; 布局评价; 模糊理论; 模糊粗糙集; 层次分析键

中图分类号: TB472; U271.91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)04-0061-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.04.007

Comprehensive Evaluation of Human-Machine Interface Layout in Train Driving Cab Based on the Multi-Level Fuzzy Theory

RAO Dong¹, CHEN Yue-yuan², LYU Wen-long¹, LANG Jia-ning³

(1.Beijing Metro Construction Administration Corporation Ltd., Beijing 100068, China; 2.Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3.NAURA Technology Group Co., Ltd., Beijing 100176, China)

ABSTRACT: The work aims to propose an evaluation method for the human-machine driving interface of train based on the multi-level fuzzy theory. Based on the driving tasks analysis, a “task-device-motion” index system for comprehensive evaluation of train driving interface was constructed from the perspective of human joint movements that can directly reflect comfort. Then, an evaluation model of train driving interface layout was built based on the multi-level fuzzy theory. By design of human factor experiment, the analytic hierarchy process and the fuzzy rough set were used to obtain the weight of indexes of each level to conduct comprehensive qualitative evaluation of the train driving interface layout. Taking the bridge layout of Beijing Metro automatic train as an example, the verification experiment confirms the feasibility and effectiveness of the comprehensive evaluation model. It provides theoretical and practical guidance for the layout design of the subway train driving interface in the early stage.

KEY WORDS: human-machine interface; layout evaluation; fuzzy theory; fuzzy rough set; analytic hierarchy

地铁列车驾驶界面是司机执行驾驶操作、监控列车运行状态的主要区域, 是司机的信息处理中心。驾驶界面的设计会对司机作业的高效性、准确性产生直

接影响^[1]。良好的列车驾驶人机界面布局设计, 能够减少人为失误, 提高对信息的读取认知速度, 提升作业绩效, 从而对保障列车安全运营具有重要作用。依

收稿日期: 2020-12-09

基金项目: 北京市轨道交通建设管理有限公司双创基金 (SCJJ2019001)

作者简介: 饶东 (1970—), 男, 北京人, 北京市轨道交通建设管理有限公司高级工程师, 主要研究方向为轨道交通电客车。

通信作者: 陈悦源 (1994—), 女, 河南人, 北京交通大学博士生, 主要研究方向为轨道交通人因与工效学。

据相关设计准则,从作业人员角度出发判断界面显控器件布局是否符合人因工程学要求的科学评价方法,是确保人机界面可用性、规范性设计的基础。在前期设计中,如果未能综合全面考虑界面设计中所涉及到的人因问题,很有可能会使得系统界面的功能无法有效地发挥或导致系统失效,甚至损害司机的健康。这些问题若在系统设计完成后期发现后再加以改进,则会造成成本的损耗。因此,需要在设计的早期阶段就对驾驶界面的合理性进行评价。从系统角度全面、综合地评价界面布局设计的优劣,使之适应列车驾驶员的作业,目前国内外研究较少,尚缺少一套完整的适用于地铁列车人机界面布局评价方法,以供实际工程中使用。因此,本文提出了对于地铁列车驾驶人机界面布局进行综合评价的方法,对列车驾驶人机界面评价指标体系的建立及综合评价模型的构建过程展开了研究。

1 现状

通过对列车驾驶界面评价研究的文献调研发现,早期对于列车驾驶界面布局的评价,主要集中于国外铁路行业的标准,如 UIC551 和 ISO 9355。标准中并未明确具体评价方法,仅提供了一般性的指导原则,难以量化实施。基于多指标综合评价方法,包括模糊集合理论,人工神经网络、层次分析法等被陆续应用于航空、轨道交通、汽车、核电、武器系统等领域的人机交互界面的评价中。Richei 等人^[2-3]证实了将模糊集合理论应用于人因评价分析的可行性,周前祥等人^[4]也构建了基于模糊因素的综合评价模型对载人航天器舱内人机界面工效学展开评价;Yeo 等人^[5]采用层次分析法与多属性决策方法相结合的方法对设计方案展开评价;范文等人^[6]基于灰色理论多属性群决策,提出了战斗机座舱人机工效评价方法;颜声远等人^[7]建立了层次分析法和神经网络主观期望评价模型对控制系统用户界面进行评价。其中,模糊综合评价方法通过采用定量和定性相结合的方式,使用精确的数字手段对蕴藏模糊性信息评价对象进行处理,使得评价结果更加科学、合理且贴近实际,能够减少主观评判自身不可避免的片面性和不准确性,使评价结果更具可信性^[8]。目前,已经广泛应用于航空^[9]、轨道交通^[10]、道路交通^[11]、电力^[12]、水利水电^[13]等多个领域的系统与界面评价。

当前有关人机界面模糊综合评价研究大多都基于交互界面的自身结构或使用特性参数,从可用性、舒适性、可维修性等角度构建评价指标体系^[9,14],对系统中处于中心位置的驾驶员人体参数的关注度却不够,且评价过程中没有结合实际的作业任务,这会导致所构建的评价指标体系以及指标权重的确定会过度依靠人员主观经验,评价结果难以和实际意义相结合。因此,本文通过对实际的列车驾驶任务展开分析,从人员动作参数出发,建立用于评价列车驾驶人

机界面布局的“任务—器件—动作”指标体系,应用多层次模糊理论,构建用于评价轨道交通车辆驾驶界面布局的模型。

2 基于多层次模糊理论的综合评价模型

多层次模糊综合评价法是以模糊理论^[15]为基础的一种将定性分析与定量分析相结合的评价方法。基于模糊数学的隶属度理论,将定性评价转化为定量评价,对现实中一些复杂的、具有不确定性和模糊性、难以量化的问题进行层析分析;同时,实现对主客观指标进行综合评价,可以在一定程度上消除主观因素影响,获得更加准确的评价结果。针对列车驾驶人机交互界面的评价问题,需要考虑的因素较多且各因素间有层次之分;驾驶界面的舒适性、安全性等指标存在模糊性,无法准确的明晰舒适及安全的划分界限。因此,本研究基于多层次模糊理论提出了一种适用于列车驾驶界面的综合评价模型。

2.1 列车驾驶界面综合评价指标体系

列车驾驶界面综合评价体系的构建是建立体系化的评价结构及具体评价指标以对列车驾驶界面进行系统性、整体性及科学性的描述。为保证评价的科学性和全面性,对于影响列车驾驶界面优劣的众多因素,需基于整体目标按照合理的结构体系考虑所有评价指标^[16],因此评价指标体系的建立是有效开展列车驾驶界面综合评价的关键和前提基础。

列车驾驶人机界面评价指标体系构建,首先应明确人机环因素与其相应的作业任务^[17]。相较于仅关注作业绩效的结果性评价,对其任务执行过程的分析能使因素间相互作用的更加清晰明了,从而保障列车运营过程中的“机宜人”特性。人员作为人机环系统中最为关键且中心的一环,其作业舒适性将直接关系到驾驶员的职业健康与列车的长期安全运营。因此从人体参数的角度出发,探讨操作驾驶界面执行任务时驾驶员基础动作关节活动指标,能够基于人体生理层面较好地对驾驶界面的操作舒适性进行评价,避免受到界面器件客观安装位置及工效标准参数的制约^[18]。另外从驾驶器件层面构建指标进行评价,在将行车任务层与执行动作层进行关联的同时,更能体现列车驾驶界面布局的合理性,从而更有利于实现对驾驶界面的综合评价。

通过探究以往的舒适性评价研究中关节动作对人员操作舒适性的影响^[19,20],构建驾驶界面布局评价指标体系,见图 1,顶层为体现作业执行过程的任务层,可将其划分为日常行车任务及特殊情况下的应急处置任务;中间为任务层,根据设备类型划分为显示和控制器件;底层则为体现驾驶人员自身感受的动作层,操作动作分别为查看显示信息的头部动作与执行操纵的上肢及腰部动作。

2.2 多层次模糊综合评价模型

多层次模糊综合评价需要先对底层因素进行评价，之后逐层向上进行评价，直至得到最终的评价结果^[21]。依据所构建的列车驾驶界面综合评价指标体系，将从高至低的任务层、器件层和动作层逆向分析，首先明确动作指标评价集，在此基础上收集驾驶员执行任务时的关节角度数值，基于隶属度函数开展模糊变换，从而获取指标体系内动作层级的评价矩阵。将该矩阵及其权重值进行一级模糊运算，从而得到器件层向量与关系矩阵，采用相同的方式逐层计算，获得最终的驾驶界面评价结果。所构建的多层次模糊列车驾驶界面综合评价模型见图 2，模糊综合评价需要明确评价等级、评价因素、隶属度、模糊评价矩阵与因素权重，接下来对模糊综合评价模型中各要素及其评价过程展开阐述。

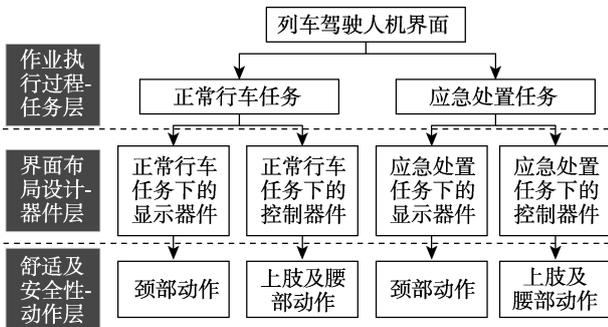


图 1 驾驶界面综合评价指标体系
Fig.1 Comprehensive evaluation index system of driving interface

2.2.1 定义因素集合 U 和评价集 V

模型共包含任务、执行任务所需器件及行为动作三个因素层，各因素层所含因素即为该指标层中的不同指标。定义包含 n 个任务的任務因素集为 $U = \{u'_1, u'_2, \dots, u'_i, \dots, u'_n\}$ ，执行任务 i 所使用的器件因素集为 $U'_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{ij}, \dots, u_{in}\}$ ，其中 t_i 为任务 i 中所使用的器件个数，即 U'_i 中的器件指标个数。进一步定义操作器件的动作因素集为：

$$u_{ij} = \left\{ \begin{matrix} \{y_{ij_a}, y_{ij_b}, \dots, y_{ij_c}\} \\ \{y_{ij_d}, y_{ij_e}, \dots, y_{ij_f}\} \end{matrix} \right\} \quad (1)$$

式中： a 和 b 为执行任务 i 时操作第 j 个器件的动作指标个数， y_{ij_a} 和 y_{ij_b} 分别表示查看显示信息动作指标和操作控制器件动作指标。

评价集是对评价指标变化区间变化的描述，例如：满意、一般、不满意等，可表示为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ ， k 为评价等级数量。

2.2.2 模糊隶属度函数

隶属度函数是用于描述模糊性的关键，研究选用三角形隶属度函数为动作层指标与评价等级间的隶属度函数。首先从人因相关标准及文献^[22]中确定各动作执行时的关节舒适等级及其活动范围，构建动作指标 x 对评价等级 v_i 的隶属度函数 $\mu_{v_i}(x)$ 。再结合后续的人因实验获取人员使用器件时的客观数据，通过与主观感受相互对照，对隶属度函数进行改进修正。

2.2.3 明确权重值

定义任务层和器件层指标的权重向量分别为

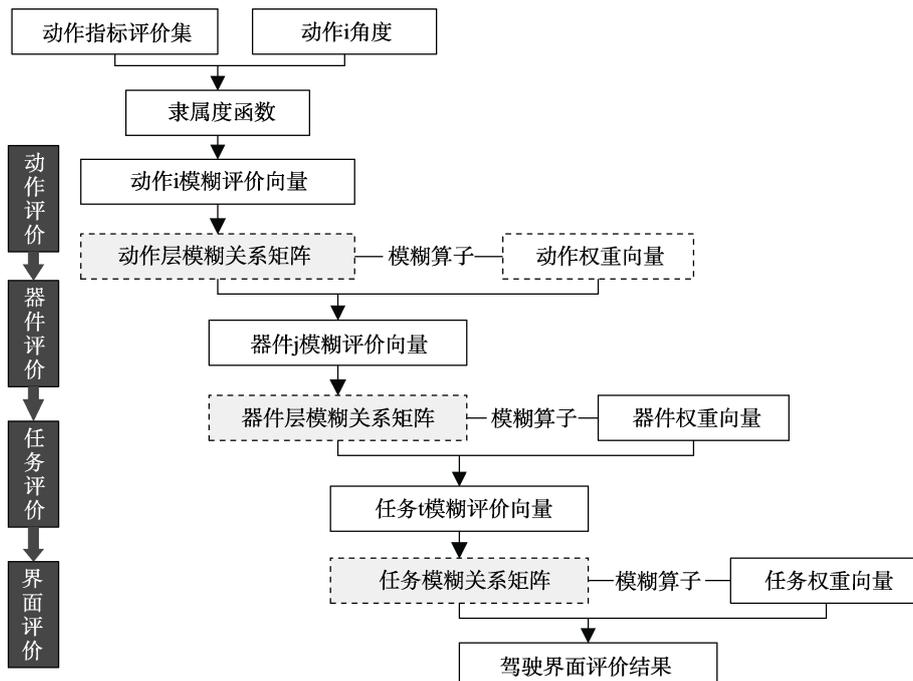


图 2 列车驾驶界面多层次模糊综合评价模型
Fig.2 Multi-level fuzzy comprehensive evaluation model for train driving interface

$W = [W_1, W_2, \dots, W_n]$ 和 $w_i = [w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{it_i}]$, 其中, n 为任务数量, t_i 为任务 i 中所使用的器件个数, $0 < W_i \leq 1$ 且 $\sum_{i=1}^n W_i = 1$, $0 < w_{ij} \leq 1$ 且 $\sum_{j=1}^{t_i} w_{ij} = 1$ 。动作层级各指标权重向量如下:

$$w_{i_i} = \left\{ \begin{array}{l} [m_{ij_1}, m_{ij_2}, \dots, m_{ij_a}] \\ [m_{ij_b}, m_{ij_c}, \dots, m_{ij_b}] \end{array} \right\} \quad (2)$$

式中: m_{ij_a} 和 m_{ij_b} 分别为查看显示器信息和操作控件动作指标权重向量, a 和 b 则表示在第 i 任务指标层中第 j 个器件下的动作指标个数, $0 < m_{ij_a} \leq 1$;

$0 < m_{ij_b} \leq 1$, 且 $\sum_{j=1}^a w_{ij} = 1$, $\sum_{j=1}^b w_{ij} = 1$ 。

2.2.4 模糊关系矩阵与评价向量

在多层模糊综合评价模型中, 将各层的模糊关系矩阵与其指标权重向量进行模糊运算, 既可获得该层的评价值。将测量得到的表征动作舒适性的关节角度数据基于隶属度函数进行模糊转换, 从而形成动作层模糊矩阵。对于动作层某指标 y_i , 其对评价等级 v_j 的隶属度为 $\mu_{v_j}(y_i) = r_{ij}$, 进而得到对于评价集 V 的模糊向量 $r_i = [r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ik}]$, 其中 k 为评价等级数。动作层 b 个关节动作对应的 b 个模糊向量构成了动作层的模糊评价关系矩阵 M :

$$M = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}, m_{12}, \dots, m_{1k} \\ m_{21}, m_{22}, \dots, m_{2k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_b, m_{b2}, \dots, m_{bk} \end{bmatrix} \quad (3)$$

基于此, 采用 $M(\bullet, +)$ 模型进行模糊运算, 第 i 个器件的模糊评价向量 S_i 为:

$$S_i = W_b \cdot M = [w_1, w_2, \dots, w_b] \cdot \begin{bmatrix} m_{11}, m_{12}, \dots, m_{1k} \\ m_{21}, m_{22}, \dots, m_{2k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_b, m_{b2}, \dots, m_{bk} \end{bmatrix} = [s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ik}] \quad (4)$$

因此, 通过计算所有 t 个器件模糊评价向量得到器件层的评价结果矩阵为 S :

$$S = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}, s_{12}, \dots, s_{1k} \\ s_{21}, s_{22}, \dots, s_{2k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{t1}, s_{t2}, \dots, s_{tk} \end{bmatrix} \quad (5)$$

同样采用 $M(\bullet, +)$ 模型, 基于器件层评价矩阵, 计算第 i 个驾驶任务的评价值 P_i 为:

$$P_i = W_i \cdot S = [w_1, w_2, \dots, w_t] \cdot \begin{bmatrix} s_{11}, s_{12}, \dots, s_{1k} \\ s_{21}, s_{22}, \dots, s_{2k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{t1}, s_{t2}, \dots, s_{tk} \end{bmatrix} = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ik}] \quad (6)$$

n 个任务模糊向量构成了评价集的任务层模糊关系矩阵 P , 以及最终的驾驶界面评价结果集合 E 为:

$$E = W_n \cdot P = [w_1, w_2, \dots, w_n] \cdot \begin{bmatrix} p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1k} \\ p_{21}, p_{22}, \dots, p_{2k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1}, p_{n2}, \dots, p_{nk} \end{bmatrix} = [e_1, e_2, \dots, e_k] \quad (7)$$

2.3 权值计算

2.3.1 层次分析法

20 世纪 70 年代, 美国学者 Saaty 提出的层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) [23] 能够有效地解决多目标决策问题中因素重要性、影响程度较难量化的问题, 一般用于明确综合评价中的权值, 在社会、管理等多个领域的应用愈发广泛 [24]。该方法首先将所有因素按照其层级关系划分为相互联系的有序层, 构建多层次的结构模型; 再将同一层级中的个元素进行优先顺序的两两比较构造判断矩阵, 得到每层中各指标因素之间的重要度排序, 即因素权重; 最后对层次单排序和一致性进行检验, 保证各因素重要度之间的协调性。

2.3.2 模糊粗糙集法

模糊粗糙集理论是 Dubois 等人 [25] 为了解决粗糙集数据处理时的离散化问题, 将模糊集引入了粗糙集所提出的。该方法能够解决具有不确定性、不完备性信息的问题, 且最大限度地保留连续属性值信息, 避免了离散化所导致的信息缺失, 使结果更加准确客观 [16]。采用模糊粗糙集法进行权值求取, 应采取以下步骤:

1) 给定有限非空集合论域 U , 模糊集 A 及隶属度函数 $\mu_A(x) \in [0, 1]$ 。论域 U 上有模糊关系 R_A , $\forall x, y \in U$, 有 $\mu_A(x) = \mu_A(y)$, 即论域 U 的模糊等价类 $[X]_{R_A}$ 。

2) 假定 (U, P) 为论域 U 的一个模糊近似空间, P 为 U 上的模糊等价关系, 令 $Fi = U/P$ 为 U 上的模糊等价关系集合, $\forall X \subseteq F$, 即 X 的下近似 P_*X 和上近似 P^*X 构成了 X 的模糊粗糙集, 其隶属度函数如下:

$$\mu_{P_*X}(x) = \sup_{F \in U/P} \min(\mu_F(x), \inf_{y \in U} \max\{1 - \mu_F(y), \mu_X(y)\}) \quad (8)$$

$$\mu_{P^*X}(x) = \sup_{F \in U/P} \min(\mu_F(x), \inf_{y \in U} \max\{\mu_F(y), \mu_X(y)\}) \quad (9)$$

3) $\forall X \subseteq U$, x 对于模糊正域的隶属度: $\mu_{pos_p(Q)}(x) = \sup_{X \in U/Q} \mu_{P_*X}(x)$, 其中, P 和 Q 分别为条件及决策属性。 Q 对 P 的依赖度, 即计算得到各因素的权值:

$$\gamma_P(Q) = \frac{\sum_{x \in U} \mu_{pos_p(Q)}(x)}{|U|} \quad (10)$$

4) 动作、器件及任务层因素权值的求取。动作层因素与驾驶员的主观舒适性感受直接相关, 基于主观评分法得到的权重取决于专家自身的知识经验, 能够直接反映人员对于各因素权重的主观判断或直觉。因此, 采用层次分析法构建层次结构模型, 并结合专家访谈, 对因素间的相对重要性展开评判, 进而得到动作因素权重。器件层与任务层因素则结合主、客观赋值, 通过对各指标展开分析, 运用模糊粗糙集法可求取定量化数值对主观评分的依赖程度, 获取器件层及任务层的因素指标权重。

将动作因素划分为查看显示信息的颈部动作及操控物理控件的上肢与腰部动作, 两动作类别又分别包含多个子因素指标, 结构层次模型见图 3。通过设计并开展人因实验, 召集被试在所评价驾驶界面上执行任务层的各驾驶任务。让被试填写两两动作的主观感受评分量表, 构建判断矩阵并对该矩阵执行一致性检验。然后根据基于被试完成作业任务时各关节角度的测量及执行各任务的主观舒适性评分, 构建模糊化决策信息表, 求取依赖度从而获得器件层和任务层因素的权重。

3 地铁列车驾驶界面器件布局的评价实例

3.1 地铁驾驶台布局评价应用案例

以北京地铁燕房线全自动地铁列车驾驶台为对象, 应用本文提出的评价方法展开研究。全自动运行地铁列车逐渐增多的功能使得众多器件和有限的布局台面之间产生冲突, 因此通过专家访谈, 文献调研等方法, 通过布局算法设计生成了十套面向全自动运行地铁的驾驶界面, 整体界面包含台面布局及侧墙布局两部分, 台面布局总面积为 790 mm×415 mm, 侧墙可布局面积为 415 mm×460 mm。

通过梳理分析地铁列车驾驶任务, 依据人因典型任务筛选原则从中选取包含段内预备、日常运营与异常的应急处置的九项典型的全自动地铁列车运营任务, 见图 4, 并明确各任务所使用器件及使用顺序。

3.2 基于人因实验的指标权重采集

3.2.1 实验被试及设备

由于列车驾驶台及其界面设计应能够满足大多数人员的使用, 依据我国成年人人体尺寸标准 GB 10000, 所选被试的人体尺寸应涵盖第 5 百分位 (5th) 至第 95 百分位 (95th), 考虑到我国目前的列车驾驶员大多为男性, 因此召集 6 名无心理和生理疾病且行为无障碍的男性被试, 年龄为 22~26 岁, 身高为 165~180 cm。

为了保障实验中不同布局方案的器件布置灵活性, 搭建了适用于开展地铁列车驾驶台人因实验的人机界面仿真环境, 见图 5。该模拟驾驶台满足标准 UIC651 设计要求, 台面各显控器件为带有磁性的 1:1ABS 模型, 能够通过随意调节器件位置从而形成不同的人机界面的布局设计。使用专业的关节活动度测量尺测量被试执行任务时各关节动作活动角度, 见图 6—8, 使用摄像机同步拍摄、录像以便后续数据核验。

3.2.2 实验任务及过程

实验要求按照 UIC651 标准要求, 根据其身材尺寸坐在指定位置, 以保证合理的眼点位置。向被试介绍实验内容, 熟悉并练习九项驾驶任务, 在被试能够较熟练的操作后开始正式实验。被试随机执行一项任务, 由主试测量并记录动作关节角度, 完成一项任务后填写动作指标重要度两两比较量表, 评价等级为 5 级, 见图 9。在九项任务全部完成后对驾驶界面操作

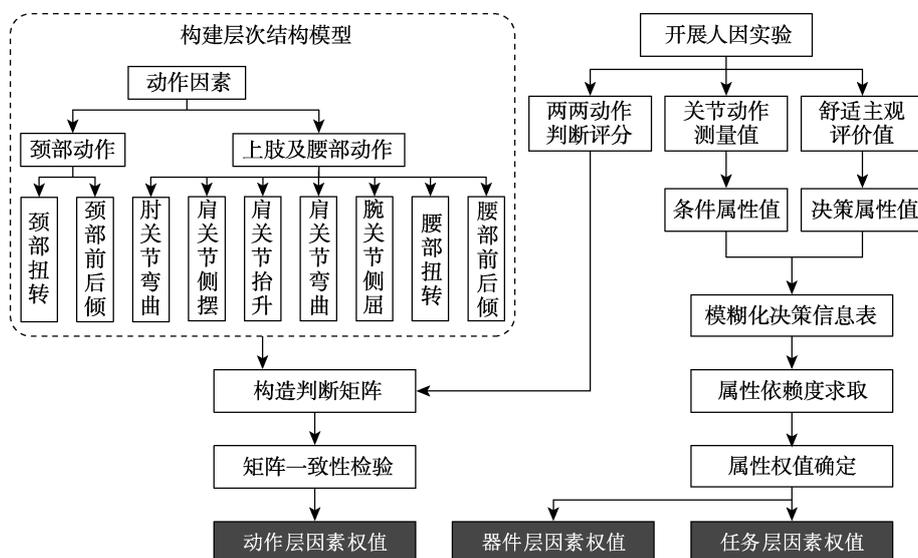


图 3 基于层次分析和模糊粗糙集的驾驶界面评价指标权重确定过程

Fig.3 Process of determining the evaluation index weight of driving interface based on based on AHP and fuzzy rough set

段内准备	上电准备、试灯试验、系统试验、预设模式出库
日常运营	停车对标开车门、关门确认信号发车、正线折返
异常处置	车门故障、列车救援

图4 九项典型地铁列车运营任务
Fig.4 Nine typical operation tasks of metro



图5 人因实验平台
Fig.5 Human factor experiment platform



图6 颈部角度测量
Fig.6 Neck angle measurement

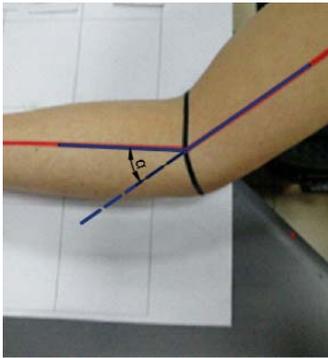


图7 肘部角度测量
Fig.7 Elbow angle measurement



图8 腕部角度测量
Fig.8 Wrist angle measurement

V	分值	评语及等级含义描述
V ₁	5	很好：非常令人满意，动作舒适
V ₂	4	好：总体令人满意，基本上处于舒适状态
V ₃	3	一般：尚可接受，动作一般，需适当调整
V ₄	2	差：令人不太满意，让人有不舒适的感觉
V ₅	1	很差：让人难以接受，非常不舒适或难以完成任务

图9 评价等级及其含义描述
Fig.9 Evaluation level and meaning description

舒适性进行评分，分值区间为 1—5，整个实验过程见图 10。

3.3 驾驶界面布局的评价结果

采用层次分析法计算动作层中关节动作指标权重。采用均值法计算被试对于关节动作两两比较的主观评分，从而获得动作指标的判断矩阵。使用显示和控制器件的关节指标判断矩阵 A_1 和 A_2 如下：

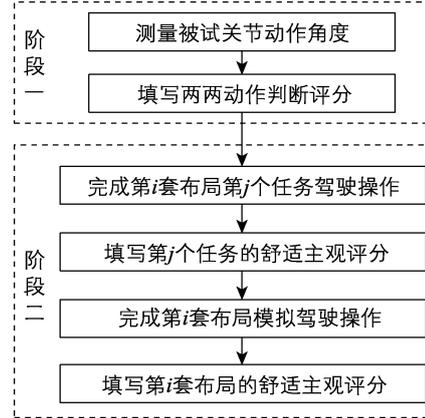


图10 权重信息采集人因实验流程
Fig.10 Human factor experiment flow of weight information acquisition

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 9/5 \\ 5/9 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 5/4 & 3/1 & 3/1 & 1 & 2/1 & 7/2 \\ 4/5 & 1 & 3/7 & 3/5 & 2/7 & 6/17 & 6/11 \\ 1/3 & 7/3 & 1 & 3/2 & 5/12 & 2/1 & 3/1 \\ 1/3 & 5/3 & 2/3 & 1 & 5/13 & 5/3 & 9/4 \\ 1 & 7/2 & 12/5 & 13/5 & 1 & 3/1 & 7/2 \\ 1/2 & 17/6 & 1/2 & 3/5 & 1/3 & 1 & 3/2 \\ 2/7 & 11/6 & 1/3 & 4/9 & 2/7 & 2/3 & 1 \end{bmatrix}$$

计算每个关节动作类中各指标的重要性次序，即指标权重见表 1。并进行一致性检验，查询得到当指标数量 $n=7$ 时，判断指标 $RI=1.32$ ，从而计算其一致性指标 $CR=0.0681<0.1$ ，则说明该判断矩阵具有较好的一致性。

器件层和任务层指标权重计算采用模糊粗糙集法。实验采集得到的六名被试在三套布局方案下的所有关节角度数据和主观评数据。每套驾驶界面布局方案均需完成之前所提取的九个典型任务，各任务包含不同数量的器件，通过对每套界面布局方案下执行九项任务时使用所需显控器件的动作关节角度模糊化处理，作为决策信息表中的条件属性值，将被试的主观评价数据作为决策属性值，构建包含十八组样本的决策信息表。之后划分等价类，并求取模糊正域隶属度和属性依赖度，从而计算权重分配。使用 MATLAB 对上述过程进行计算，最终求得地铁驾驶九项典型任务的权重分配及各任务下的器件权重见表 2。

基于上文所提出的多层次模糊评价综合模型，从多种设计方案中筛选出评分最高的布局方案见图 11，其基于评价模型得分为 3.84 分，且具有最高的主观布局评价得分 4.3 分，说明该套人机交互驾驶界面布局设计在多套方案中具有最佳的评价结果，不仅能够满足列车驾驶员在执行各项任务时的作业需求，同时保障了使用显控器件时的舒适性与安全性。

表 1 动作层指标权重值
Tab.1 Index weight values of motion level

关节动作类	器件	权重	器件	权重
显示	颈部前后倾	0.64	颈部扭转	0.36
	肘关节弯曲	0.23	腕关节侧屈	0.27
控制	肩关节侧屈	0.07	腰部前倾	0.10
	肩关节抬升	0.15	腰部转动	0.07
	肩关节弯曲	0.11		

表 2 九个任务权重分配及各个任务下器件权重向量
Tab.2 Weight allocation of nine tasks and device weight vector of each task

驾驶任务	器件权重向量 w_i	任务权重 W
上电准备	$w_1=(0.140,0.152,0.143,0.138,0.137,0.144,0.147)$	0.098
试灯试验	$w_2=(0.130,0.133,0.154,0.155,0.144,0.171,0.113)$	0.126
系统试验	$w_3=(0.145,0.113,0.120,0.117,0.126,0.142,0.119,0.117)$	0.108
预设模式出库	$w_4=(0.141,0.137,0.140,0.117,0.105,0.117,0.117,0.126)$	0.113
停车对标开车门	$w_5=(0.217,0.197,0.217,0.183,0.186)$	0.128
关门发车	$w_6=(0.145,0.137,0.099,0.114,0.14,0.124,0.114,0.119)$	0.120
车门故障	$w_7=(0.107,0.101,0.088,0.090,0.084,0.093,0.089,0.091,0.091,0.087,0.081)$	0.101
列车救援	$w_8=(0.130,0.135,0.120,0.117,0.131,0.124,0.129,0.113)$	0.1
正线折返	$w_9=(0.112,0.094,0.103,0.093,0.102,0.098,0.089,0.102,0.101,0.106)$	0.107

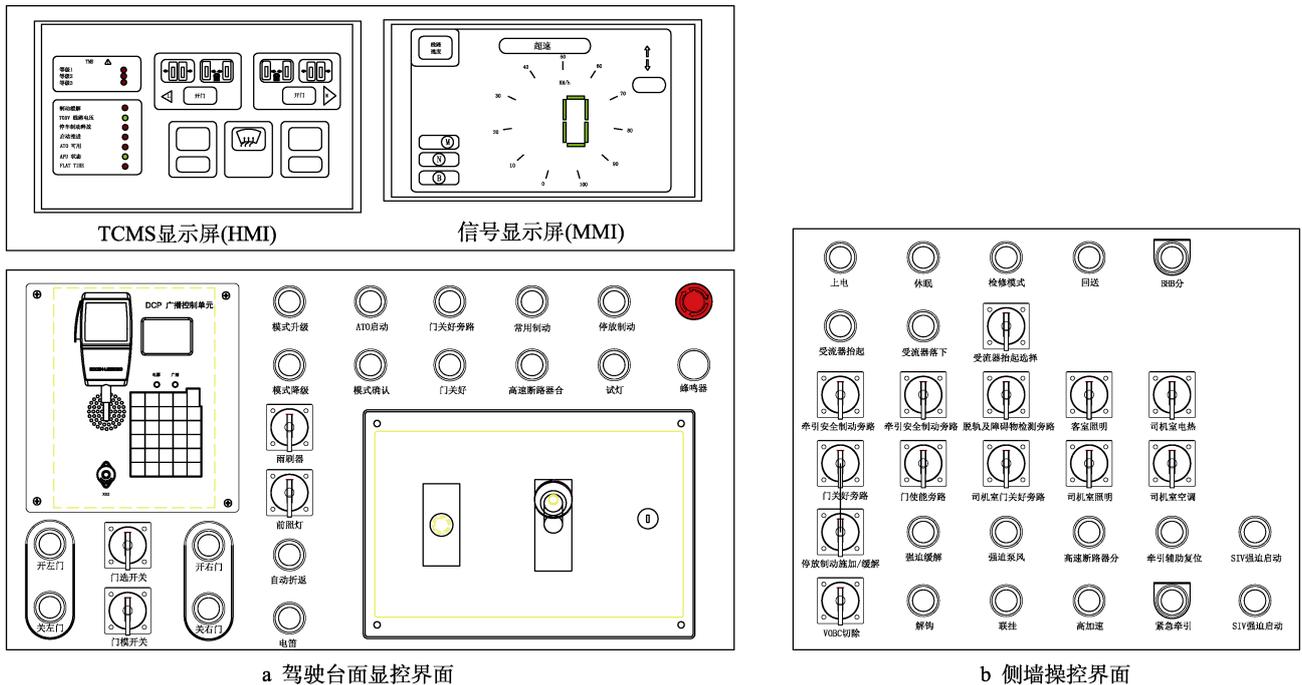


图 11 最佳布局方案
Fig.11 Optimal layout scheme

4 综合评价模型的验证

为论证本研究所提出的驾驶界面综合评价模型的可行性及正确性，开展了验证实验。采用同权重信息采集相同的实验平台，召集十名第五百分位人体尺寸且了解人因工程专业知识的男性被试，年龄为

23~25 岁。主试为所有被试讲解地铁列车驾驶任务及其涵盖的器件等相关知识，并熟悉所有实验流程后，被试按照标准作业姿势就坐于驾驶座椅上，要求十名被试在十套不同布局方案的驾驶界面上依次完成九项任务并填写主观舒适性评价量表。

基于所构建的列车驾驶界面布局综合评价模型，



图12 模型验证主观评价实验

Fig.12 Subjective evaluation experiment of model validation

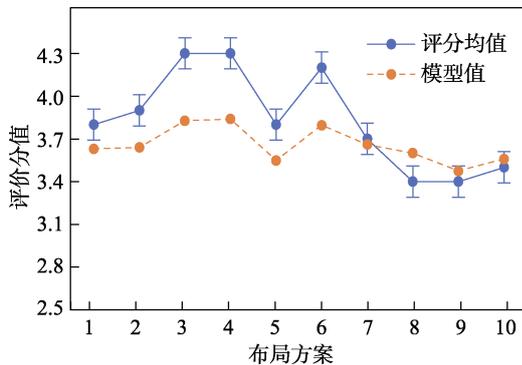


图13 主观评价结果与模型评价结果对比

Fig.13 Comparison between subjective evaluation results and model evaluation results

计算十套布局方案评分值，并与主观评分进行对比，见图13。能够发现主观评分与评价得分基本相近，进一步使用SPSS进行皮尔逊相关性分析，统计分析结果显示，主观评价与模型计算值具有显著的相关性 ($P < 0.01$)，从而证实了本研究所提出的驾驶界面布局综合评价模型的与人员主观感受之间具有一致性，即该模型有效性得到验证。

5 结语

科学合理的地铁列车驾驶人机界面布局评价对于提升城市轨道交通驾驶系统整体的性能和安全性具有重要作用。本文构建了列车驾驶界面“任务—器件—动作”评价指标体系，采用多层次模糊综合评价法对界面布局设计的合理性进行综合评价分析，并结合实际案例验证了该综合评价模型的有效性与可行性。

该方法所构建的评价指标体系使得评价范围进一步明确细化，评价体系底层的动作层指标能够直观的反应驾驶员的舒适性，实现了将以人为中心的设计理念贯彻入具体的工程设计。主客观相结合的评价模型一定程度上避免了主观方法片面性和随意性，同时也提升了评价的准确度。多层次的评价结果有利于在设计早期阶段发现问题、指出问题所在、及早处理并

解决，提高了设计效率的同时也大大节省了生产成本。因此，本文所提出的综合评价模型不仅为地铁列车驾驶人机界面布局的评价分析提供科学有效的方法论支持，也为提升地铁运营安全水平奠定了理论和应用基础。

参考文献:

- [1] 郭北苑. 高速列车驾驶界面人因适配性设计理论与方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
GUO Bei-yuan. Research on the Human Compatibility Design Theory and Method of High-Speed Train Driving Interface[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [2] RICCHI A, HAUPTMANN S U, UNGER H. The Human Error Rate Assessment and Optimizing System Heros New Procedure for Evaluating and Optimizing the Man-machine Interface in Psa[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2001, 72(2): 153-164.
- [3] MITAL A, KARWOWSKI W. Towards the Development of Human Work-performance Standards in Futuristic Man-machine Systems: a Fuzzy Modeling Approach[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 19(2): 133-147.
- [4] 周前祥, 姜国华. 基于模糊因素的载人航天器乘员舱内人一机界面工效学评价研究[J]. 模糊系统与数学, 2002, 16(1): 99-103.
ZHOU Qian-xiang, JIANG Guo-hua. Research on Ergonomics Evaluation of Human-machine Interface in Manned Spacecraft Crew Compartment Based on Fuzzy Factors[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2002, 16(1): 99-103.
- [5] YEO S H, MAK M W, BALON S A P. Analysis of Decision-making Methodologies for Desirability Score of Conceptual Design[J]. Journal of Engineering Design, 2004, 15(2): 195-208.
- [6] 范文, 余隋怀, 刘国昌, 等. 战斗机座舱人机工效评价方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2015(6): 231.
FAN Wen, YU Sui-huai, LIU Guo-chang, et al. Ergonomics Evaluation Method of Fighter Cockpit[J]. Computer Engineering and Applications, 2015(6): 231.
- [7] YAN Sheng-yuan, YU Xiao-yang, ZHANG Hong-guo, et al. Research of Software User Interface Evaluation Method based on Subjective Expectation[C]//2007 International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE, 2007.
- [8] 韩利, 梅强, 陆玉梅, 等. AHP-模糊综合评价方法的分析与研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(7): 86-89.
HAN Li, MEI Qiang, LU Yu-mei, et al. Analysis and Study on AHP-Fuzzy Comprehensive Evaluation[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(7): 86-89.
- [9] 宋海靖, 胡毅, 黄丙寅. 民航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——中国航空学会青年科技论坛, 2014.

- SONG Hai-jing, HU Yi, HUANG Bing-yin. Study of Fuzzy Comprehensive Evaluation for Civil Aircraft Cockpit Ergonomics of Display Equipment[C]// Exploring innovative exchanges-China Aviation Society Youth Science and Technology Forum, 2014.
- [10] 苗长俊. 基于多层次模糊综合评价的铁路车站安全运营管理分析[J]. 铁道运输与经济, 2019, 41(1): 94-99.
- MIAO Chang-jun. An Analysis on the Safe Operation Management Evaluation of the Railway Station based on the Multi-Level Fuzzy Comprehensive Evaluation Method[J]. Railway Transport and Economy, 2019, 41(1): 94-99.
- [11] 刘述文. 汽车驾驶室人机界面多层次模糊综合评价[J]. 可编程控制器与工厂自动化, 2014(5): 53-55.
- LIU Shu-wen. Multi-level Fuzzy Comprehensive Evaluation for Human Machine Interface in Cab[J]. Programmable Controller & Factory Automation, 2014(5): 53-55.
- [12] 陈连栋, 吕春梅. 基于模糊综合评判的电力风险评估方法的研究[J]. 电力科学与工程, 2010, 26(11): 50-54.
- CHEN Lian-dong, LYU Chun-mei. Research on Power Risk Assessment Method Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation[J]. Electric Power Science and Engineering, 2010, 26(11): 50-54.
- [13] 王云方. 基于模糊综合评价法的中小水利水电工程施工质量评价[J]. 中国战略新兴产业, 2018(8): 175.
- WANG Yun-fang. Evaluation for Middle and Small Water Conservancy and Hydropower Project Construction Quality based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method[J]. China Strategic Emerging Industry, 2018(8): 175.
- [14] 张志俭, 陈乃巨. 基于人因指数的人机界面评价[J]. 人类工效学, 2004, 10(4): 26-30.
- ZHANG Zhi-jian, CHEN Nai-ju. Evaluation of Human-Machine Interface Based on Human Factor Indicator[J]. Chinses Journal of Ergonomics, 2004, 10(4): 26-30.
- [15] ZADEH L A. Shadows of Fuzzy Sets[J]. Problemy Peredachi Informatsii, 1966, 2(1): 37-44.
- [16] 詹自翔. 高速列车驾驶界面布局与适配性评价方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- ZHAN Zi-xiang. Layout and Suitability Evaluation Method for Driving nterface of High-speed Train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [17] 赵君, 郝建平, 李星, 等. 装甲车驾驶舱人机界面评价指标体系研究[J]. 人类工效学, 2008, 14(4): 53-56.
- ZHAO Jun, HAO Jian-ping, LI Xing, et al. Research on Evaluation Index System of Man-machine Interface in Armored Vehicle Cockpit[J]. Chinses Journal of Ergonomics, 2008, 14(4): 53-56.
- [18] 郎佳宁. 一种面向全自动运行地铁驾驶界面布局设计方法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- LANG Jia-ning. Research on a Design Method of Driving Interface Layout for Fully Automatic Operation Metro[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [19] 马佳, 范智声, 阮莹, 等. 舒适驾驶姿势试验及模糊评价[J]. 工业工程与管理, 2008, 13(4): 121-125.
- MA Jia, FAN Zhi-sheng, RUAN Ying, et al. The Test of Comfortable Driving Posture and the Fuzzy Evaluation of the Comfort[J]. Industrial Engineering and Management, 2008, 13(4): 121-125.
- [20] 张立博, 袁修干, 王黎静, 等. 基于主观感觉的人体关节活动舒适性评价[J]. 航天医学与医学工程, 2006, 19(6): 412-416.
- ZHANG Li-bo, YUAN Xiu-gan, WANG Li-jing, et al. Evaluation of Joint Motion Based on Perceived Discomfort[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2006, 19(6): 412-416.
- [21] 余忠礼, 王晓东. 基于多层次模糊综合评判及模糊理论的设备维修研究[J]. 计算机与数字工程, 2016(6): 1044-1049.
- YU Zhong-li, WANG Xiao-dong. Maintenance Research of Equipment Based on Multi-level Fuzzy Comprehensive Evaluation Method and Fuzzy Theory[J]. Computer & Digital Engineering, 2016(6): 1044-1049.
- [22] KEE D, KARWOWSKI W. Ranking Systems for Evaluation of Joint and Joint Motion Stressfulness Based on Perceived Discomforts[J]. Applied Ergonomics, 2003, 34(2): 167-176.
- [23] SAATY T L. Modeling Unstructured Decision Problems the Theory of Analytical Hierarchies[J]. Mathematics and Computers In Simulation, 1978, 20(3): 147-158.
- [24] 兰继斌, 徐扬, 霍良安, 等. 模糊层次分析法权重研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(9): 107-112.
- LAN Ji-bin, XU Yang, HUO Liang-an, et al. Research on the Priorities of Fuzzy Analytical Hierarchy Process[J]. System Engineering Theory and Practice, 2006, 26(9): 107-112.
- [25] DUBOIS D, PRADE H. Putting Rough Sets and Fuzzy Sets Together[M]. NewYork: Springer, 1992.