

doi: 10.7690/bgzdh.2013.04.009

导弹发射设备人机匹配性能评估方法

王君, 蔡伟, 王连劲

(第二炮兵工程大学二系 202 室, 西安 710025)

摘要: 为了提高导弹武器系统发射设备的人机适应性, 提出一种基于模糊综合评判的评估方法。在深入分析发射设备人机匹配性能的影响因素的基础上, 确立了综合评估方法和评判指标, 运用层次分析法确定各指标的权值, 采用模糊综合评判法对系统的人机匹配性能进行定量评估, 得出显示控制装置的综合化程度、操作简易性、总体布局合理性和屏蔽冗余性能等方面是影响发射设备人机匹配性能的主要因素。该分析结果可为导弹发射设备的研制、改型提供工效学的技术支持。

关键词: 发射设备; 人机匹配; 评估指标; 模糊综合评判

中图分类号: TJ768.3 **文献标志码:** A

Evaluation Method of Human-Machine Interface Matching for Missile Launching Device

Wang Jun, Cai Wei, Wang Lianjin

(No. 202 Staff Room, No. 2 Department, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: An evaluation method based on fuzzy comprehensive evaluation theory was put forwards to improve the human-machine interface capability of the missile weapon system. Based on analyzing affecting factors of human-machine interface matching performance of launch equipment, establish a comprehensive evaluation method and index. Use AHP to ascertain the weight vector of each index. Use fuzzy synthetic assessment method to carry out quantitative analysis on the human-machine interface capability of system. The result shows comprehensive level of display-control devices, operation accessibility, workplace layout and shielding redundancy are main factors affecting human-machine interface capability of the launching devices, which could serve as ergonomics support for manufacture and remodification of the launching devices.

Key words: launching device; human-machine interface matching; evaluation index; fuzzy synthetic assessment

0 引言

复杂人机系统的安全性不仅取决于其自身的技术水平, 还极大地依赖于它与人和环境的协调程度^[1-2]。发射设备是导弹武器系统的关键地面设备, 在支撑导弹、实施导弹发射准备和发射导弹等方面占据重要地位^[3]。然而实践表明: 现有发射设备人机适应性远未完善, 误操作事件频繁发生, 导致导弹地面设备面临的风险显著增加。究其原因, 发射设备人机适应性水平较低, 缺乏有效系统分析与评估是重要影响因素之一^[3-4]。

因此, 笔者在分析导弹武器系统人机界面特点和人机匹配性影响因素的基础上, 构建了发射设备人机匹配综合评估指标, 采用多目标模糊综合评价方法, 对系统的人机匹配性能进行了定量评估, 并根据评估结果提出改进建议。

1 评估指标的选定

发射设备的 2 大分系统包括液压系统和调平起竖控制系统, 均设计有大量的控制装置和显示装置, 操作复杂、号手间协作环节多, 人与发射设备在交

互过程中形成的人机界面的匹配合理性, 直接影响着装备战斗力和总体效能的发挥^[5]。

按照人机工程学相关理论^[6], 人机匹配状况评估应从 5 个方面入手, 即显示器与人的信息通道特性的匹配, 控制器与人体运动特性的匹配, 显示器与控制器之间的匹配, 环境与操作者适应性的匹配, 人-机-环境要素与作业之间的匹配等。

笔者评估的人机界面主要由液压电控操作箱、调平起竖控制机、调平起竖功率控制器、插拔电控箱等设备组成, 其主要功能是: 完成发射车在发射阵地的调平起竖、下放撤收, 以及水平装填前的准备工作。从文献[7-9]可知, 综合技术水平直接影响并反映号手的操作完成情况, 先进显示控制技术的采用能从根本上保证导弹武器系统具有优良的性能; 显示装置的作用是为号手提供实时信息, 以便正确地完成各项操作, 因此显示及时度、可靠度等是显示水平高低的决定因素; 人机工效关系到人的工作效率和质量, 要从显控装置布局、照明等不同角度评价现有设计是否满足工效学要求。容错水平是衡量导弹武器系统质量和水平的重要标志, 高水

收稿日期: 2012-10-03; 修回日期: 2012-11-23

作者简介: 王君(1987—), 男, 山东人, 在读硕士, 从事自动检测与故障诊断研究。

平的容错设计能显著提高系统的可靠性与安全性。

经过上述分析, 笔者确立了发射设备人机匹配性能综合评价指标, 如图1所示。该指标分为2级, 综合技术水平、控制水平、显示水平、人机工效和容错水平等5个方面是性能优劣的主要影响因素, 将其列为第一层因素, 令因素论域 $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5\}$; 把上述各项因素逐一分解为技术先进性、综合控制水平、照明工效等19个第2层因素, 其中 $U_1 = \{U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}\}$, $U_2 = \{U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24}, U_{25}\}$, $U_3 = \{U_{31}, U_{32}, U_{33}, U_{34}\}$, $U_4 = \{U_{41}, U_{42}, U_{43}, U_{44}\}$, $U_5 = \{U_{51}, U_{52}\}$ 。

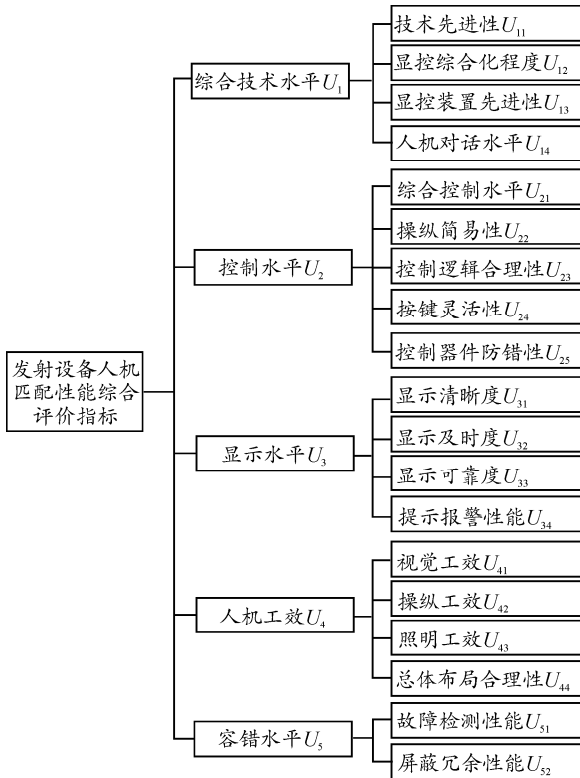


图1 发射设备人机匹配性能综合评价指标

2 模糊评价的数学方法

2.1 数学模型

参考文献[10-11], 笔者对各个因素采取5个评价等级, 其论域 $V = \{\text{差, 较差, 一般, 较好, 好}\}$, 将各评价等级的取值进行模糊化, 从而得到与评价论域 V 相对应的取值论域 $\Omega = \{0 \sim 2, 2 \sim 4, 4 \sim 6, 6 \sim 8, 8 \sim 10\}$ 。

根据因素集与评价集的关系, 建立 U 对应于 V 的模糊映射 $U \rightarrow f(V)$, 设 R_i 为一级模糊综合评价的单因素评价矩阵, 则

$$R_i = \begin{pmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \cdots & r_{i1p} \\ r_{i21} & r_{i22} & \cdots & r_{i2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{im1} & r_{im2} & \cdots & r_{imp} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $r_{ijk}(i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m; k=1,2,\dots,p)$, 按第 i

类中第 j 个元素 u_{ij} 评价, 评价对象隶属于评价集中第 k 个元素的隶属度。

二级模糊综合评价的数学模型为

$$B = (\bar{b}_1, \bar{b}_2, \dots, \bar{b}_p) = A \circ \xi = A \circ \begin{pmatrix} A_1 \circ R_1 \\ A_2 \circ R_2 \\ \vdots \\ A_n \circ R_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中, A 与 R 的运算方式有多种, 模型中采用 $M(\cdot, +)$ 的加权平均算法, 既考虑了所有因素的影响, 又保留了单因素评估的全部信息; A_i 为第2层第 i 类的各因素分配的权重组成的权重集 $A_i = \{\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{im}\}$; A 为第1层中的各因素分配的权重组成的权重集 $A = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}$ 。

对 B 进行归一化运算, 有

$$b_i = \bar{b}_i / \sum_{i=1}^p \bar{b}_i \quad (3)$$

式中 \bar{b}_i 为公式(2)中原始计算结果。

由此可得, $B = (b_1, b_2, \dots, b_p)$, 矩阵中各元素的大小即为综合评判优劣程度, 根据最大隶属原则^[12], 若 b_k 最大, 则第 k 种评判作为对系统最终评判结果。

2.2 确定权重集

权重集反映了各评价指标重要程度的量化系数。确定权重的方法很多, 层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)通过构造比较矩阵, 得到层次中诸要素的相对重要性^[4,13]。

根据1~9比例标度法, 对同层次两两比较量化, 可求得判断矩阵 C 。

求 C 的最大特征根所对应的特征向量:

$$\omega_i = \bar{\omega}_i / \sum_{i=1}^n \bar{\omega}_i \quad (4)$$

$$\bar{\omega}_i = \left(\prod_{j=1}^m c_{ij} \right)^{1/m} \quad (5)$$

式中 c_{ij} 为对同层次两两比较量化初始结果。

计算矩阵 C 的最大特征根:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(C\omega)_i}{n\omega_i} \quad (6)$$

进行一致性检验, 偏差一致性指数:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

由此, 可得各级指标相对于上一层的权重, 而 ω_{ij} 的计算方法同 ω_i 。

2.3 模糊隶属度

隶属度反映评价因素在该指标体系下对某一评

语的符合程度^[13]。确定隶属函数的常用方法有：主观经验法、模糊统计法和指派法。由于各评价等级都采用完全相同的分级形式，笔者采用如下所列的隶属度函数^[14-15]，表达式为：

$$\mu_{i1} = \begin{cases} 0, & x \geq 3 \\ \frac{1}{2} \left[\cos \frac{x-1}{2} \pi + 1 \right], & 1 \leq x \leq 3 \\ 1, & x \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{i2} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[\cos \frac{x-3}{2} \pi + 1 \right], & 1 \leq x \leq 5 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_{i3} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[\cos \frac{x-5}{2} \pi + 1 \right], & 3 \leq x \leq 7 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu_{i4} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[\cos \frac{x-7}{2} \pi + 1 \right], & 5 \leq x \leq 9 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

$$\mu_{i5} = \begin{cases} 1, & x \geq 9 \\ \frac{1}{2} \left[\cos \frac{x-9}{2} \pi + 1 \right], & 7 \leq x \leq 9 \\ 0, & x \leq 7 \end{cases} \quad (12)$$

3 模糊综合评判

依据上述模型，通过对 5 名操作人员的问卷调查，对某型发射设备的人机匹配性能进行了评定，结果如表 1 所示；同时根据专家意见构建判断关系矩阵，按 2.2 节步骤求得各级评估指标相对于上一层的权系数，见表 1。

表 1 某型发射设备人机匹配性能指标评估值及权重

一级指标 权重	二级指标 权重	人员 1	人员 2	人员 3	人员 4	人员 5	取值
U ₁ (0.223 2)	U ₁₁ (0.288 4)	一般	较好	一般	一般	较好	5.6
	U ₁₂ (0.532 9)	较好	一般	较好	一般	一般	7.0
	U ₁₃ (0.067 4)	一般	较差	一般	一般	一般	4.5
	U ₁₄ (0.111 3)	一般	一般	较好	较差	一般	4.5
U ₂ (0.367 0)	U ₂₁ (0.262 8)	一般	较差	一般	较好	一般	5.6
	U ₂₂ (0.475 8)	好	一般	较好	一般	较差	7.0
	U ₂₃ (0.052 9)	一般	一般	较好	一般	一般	5.0
	U ₂₄ (0.085 8)	较好	较差	一般	一般	一般	4.5
	U ₂₅ (0.122 7)	一般	较好	一般	一般	较差	5.6
U ₃ (0.054 8)	U ₃₁ (0.190 7)	一般	一般	较差	较好	一般	5.0
	U ₃₂ (0.121 9)	较差	一般	一般	较	一般	5.0
	U ₃₃ (0.077 9)	一般	较好	一般	好	较好	7.0
	U ₃₄ (0.609 5)	较好	一般	好	好	一般	7.0
U ₄ (0.203 2)	U ₄₁ (0.352 8)	一般	一般	较好	一般	一般	5.5
	U ₄₂ (0.132 7)	一般	一般	较好	一般	一般	5.5
	U ₄₃ (0.075 4)	较差	一般	较好	一般	一般	5.0
	U ₄₄ (0.439 1)	一般	一般	一般	较差	一般	4.3
U ₅ (0.152 0)	U ₅₁ (0.333 3)	一般	较差	较好	一般	好	6.8
	U ₅₂ (0.666 7)	一般	一般	较差	一般	一般	4.2

将表 1“取值”项目中的数值分别代入式 (8)~式 (12) 可得评价因素矩阵 R_i：

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1464 & 0.1464 \\ 0.7939 & 0 & 0.8536 & 0.8536 \\ 0.2061 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1464 & 0 \\ 0.7939 & 0 & 1 & 0.8536 & 0.7939 \\ 0.2061 & 1 & 0 & 0 & 0.2061 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$R_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$R_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2730 \\ 0.8536 & 0.8536 & 1 & 0.7270 \\ 0.1464 & 0.1464 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$R_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0.3455 \\ 0.0245 & 0.6545 \\ 0.9755 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

对二级因素进行的评价结果为：

$$\xi_1 = A_1 R_1 = (0 \quad 0.0289 \quad 0.3815 \quad 0.5923 \quad 0)$$

$$\xi_2 = A_2 R_2 = (0 \quad 0.0126 \quad 0.4322 \quad 0.5552 \quad 0)$$

$$\xi_3 = A_3 R_3 = (0 \quad 0 \quad 0.3126 \quad 0.6874 \quad 0)$$

$$\xi_4 = A_4 R_4 = (0 \quad 0.1199 \quad 0.8090 \quad 0.0711 \quad 0)$$

$$\xi_5 = A_5 R_5 = (0 \quad 0.2394 \quad 0.4445 \quad 0.3251 \quad 0)$$

对一级因素的评价结果

$$B = A(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5) = (0, 0.0705, 0.4920, 0.4375, 0)$$

根据计算结果，可得如下结论：

1) 结合评判向量中 0.492 0 与 0.437 5 相近的实际情况，根据最大隶属原则认为，该发射设备人机匹配性能较好，但仍需进一步改进。

2) 显示控制装置的综合化程度、操作简易性、总体布局合理性和屏蔽冗余性能等方面是影响发射设备人机匹配性能的主要因素。综合以上可能性因素，给出的应对措施^[8,16]如下：

- ① 革新部分落后的设计理念和技術，借鉴先进的显示和操纵控制设计，提高使用舒适性与高效性；
- ② 将显示器、仪表和控制装置合理分组，使用最频繁的和最重要的显示控制器件应安排在最佳视区内和最容易接近的位置；
- ③ 改进控制外观、电路或软件设计，采用盖板、差错提示和联锁等防错技术，进一步提高操作的约束条件；
- ④ 提高操作号手训练水平，建立科学完备的操作规程。

4 结论

通过对比部队调研结果发现，所提取的指标满足有用性等原则的要求，可为导弹发射设备的研制、改型提供工效学的技术支持，对导弹武器系统的人机工效评价具有一定的应用价值和理论指导意义。

参考文献：

[1] 张力, 王以群, 黄曙东. 人因事故纵深防御系统模型[J]. 南华大学学报, 2001, 2(1): 31-34.