

破甲战斗部模拟动破甲试验中人因可靠性分析

肖军, 李俊耀*, 张浩, 刘奎显, 马骏

(华阴兵器试验中心, 陕西 华阴 714200)

摘要: **目的** 对破甲战斗部模拟动破甲试验中人因失误问题进行研究。**方法** 基于人员认知可靠性 (HCR) 的分析方法, 建立破甲战斗部模拟动破甲试验操作中的技能-规则-知识 (SRK) 人员认知模型, 采用人员认知模式, 确定重要响应动作及行为类型, 运用人因失误概率计算方法, 计算试验过程中的人因失误概率。**结果** 得到了异常燃爆品销毁和引信保险解除是人因失误概率较高的 2 个高风险因子。最后分析了影响人因失误概率的因素, 并给出了人因失误预防与控制方法。**结论** 实际应用表明, 人因失误概率计算准确, 预防和控制方法有效。

关键词: 破甲战斗部; 模拟动破甲试验; 人员认知可靠性; 人因可靠性; 人因失误; 技能-规则-知识

中图分类号: TJ410

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)10-0026-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.10.003

Human Reliability Analysis in Simulated Dynamic Armor Piercing Tests of Armor Piercing Warheads

XIAO Jun, LI Junyao*, ZHANG Hao, LIU Kuixian, MA Jun

(Huayin Ordnance Test Center, Shaanxi Huayin 714200, China)

ABSTRACT: The work aims to study the issue of human error in the simulated dynamic armor piercing tests of armor piercing warheads. Based on human cognition reliability (HCR) method, a skill-rule-knowledge (SRK) human cognition model was established for simulated dynamic armor piercing tests of armor piercing warheads. The human cognition model was adopted to determine important response actions and behavior models. The human accident probability calculation method was used to calculate the human accident probability during the test process. The destruction of abnormal explosive materials and the release of fuse safety were the two response actions with the highest probability of human error. The factors influencing the probability of human error were analyzed and the methods for preventing and controlling human error were provided. Practical applications have shown that the calculation of human error probability is accurate and the prevention and control methods are effective.

KEY WORDS: armor piercing warheads; simulated dynamic armor piercing test; human cognition reliability (HCR); human reliability; human error; skill-rule-knowledge (SRK)

收稿日期: 2024-06-18; 修订日期: 2024-07-16

Received: 2024-06-18; Revised: 2024-07-16

基金项目: 技术研究项目 (LJ20222C030112)

Fund: Technical research projects (LJ20222C030112)

引文格式: 肖军, 李俊耀, 张浩, 等. 破甲战斗部模拟动破甲试验中人因可靠性分析[J]. 装备环境工程, 2024, 21(10): 26-33.

XIAO Jun, LI Junyao, ZHANG Hao, et al. Human Reliability Analysis in Simulated Dynamic Armor Piercing Tests of Armor Piercing Warheads[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(10): 26-33.

*通信作者 (Corresponding author)

破甲战斗部是利用炸药爆炸时的聚能效应产生连续密实的高温、高速金属射流, 击穿装甲、杀伤人员、破坏装备的武器^[1-2]。破甲战斗部模拟动破甲试验时, 一般采用火箭橇试验或数字仿真方法^[3-7]。火箭橇试验方法开展破甲战斗部模拟动破甲试验时, 结果准确, 数据获取率高, 因此得到广泛应用。试验时, 战斗部解除引信保险后, 利用火箭发动机将橇车在轨道上加速至导弹飞行速度后撞击靶标, 模拟破甲战斗部攻击目标, 考核战斗部的动破甲能力^[8]。由于试验环境模拟逼真、周期短、成本低、数据获取方便, 因此在导弹试验中应用广泛。在试验过程中, 橇车运行速度高 (200~300 m/s), 战斗部、火箭发动机等燃爆品危险等级高, 操作人员在火箭发动机内阻测量、战斗部安装、引信保险解除及火箭发动机点火发射等操作中安全风险高, 稍不注意就会发生战斗部早炸、火箭发动机意外点火等事故, 造成设备损坏甚至人员伤亡。因此, 有必要分析试验流程, 准确查找与改进试验过程中诱发差错行为的关键环节, 确保试验过程中人员和装备安全^[9-10]。

针对破甲战斗部模拟动破甲试验操作复杂, 诱发差错行为多的问题, 基于人员认知可靠性 (HCR) 的分析方法, 建立了试验操作中的技能-规则-知识 (SRK) 人员认知模型, 分析了破甲战斗部模拟动破甲试验流程, 计算试验过程中的人因失误概率, 给出了人因失误预防与控制方法, 提高了破甲战斗部模拟动破甲试验中人因可靠性, 对减少人因失误, 提高试验安全性具有重要意义。

1 HCR 人因可靠性分析模型

人因可靠性分析 (Human Reliability Analysis, HRA) 始于 20 世纪 50 年代, 通过人对任务理解、任务分析、人误辨识、行为因子分析等流程, 应用系统

分析、概率统计、行为统计等基础理论, 对人的可靠性进行定性、定量分析, 以达到预防或减少人为失误为目标, 将定性定量结合进行风险分析的方法^[11-13]。按分析方法时间进程分类, 目前已经发展至第三代。但在核电、石油化工、航空航天等工业系统中广泛运用的还是第一代 (静态的人因可靠性分析方法), 第二代 (动态的人因可靠性分析方法) 尚未在核电厂工程实践中正式运用, 第三代 (动态仿真的人因可靠性分析方法) 仍在不断完善^[14-15]。

人员认知可靠性 (Human Cognition Reliability, HCR) 模型是 1984 年由 Hannaman 和 Spurgin 等人提出的, 是第一代的可靠性定量分析方法中的典型方法^[16]。HCR 模型用于定量分析事件发生后操作人员的行为。它根据系统的人机交互界面、人的认知特点以及中值响应时间来建立时间-可靠性模型, 评价操作人员在有限时间内的响应失误概率与响应时间之间的数值关系, 是定量计算规定任务时间下响应失误概率的方法。该方法在核电站操作安全、飞行安全、船舶操作安全和化工安全操作等领域应用广泛, 对预防和减少人因事故发生具有显著效果^[17]。

1.1 HCR 模型

人员认知可靠性 (HCR) 根据作业人员的例行工作情况、培训程度等, 将系统中所有人员动作的行为分类分为基于技能的行为 (S)、基于规则的行为 (R) 和基于知识的行为 (K) 3 种层次, 如图 1 所示^[13,18]。

基于技能的行为 (S): 操作人员不需要解释显示信息, 不依赖于执行操作复杂程度的无意识行为造成的操作错误, 而只依赖于操作人员接受的培训水平和具备的完成该任务的实践经验, 这类行为可以划归为基于技能的行为。在技能型行为中, 人对行为绝大多数选择、决定都有正确的理解。

基于规则的行为 (R): 操作人员能清楚地了解

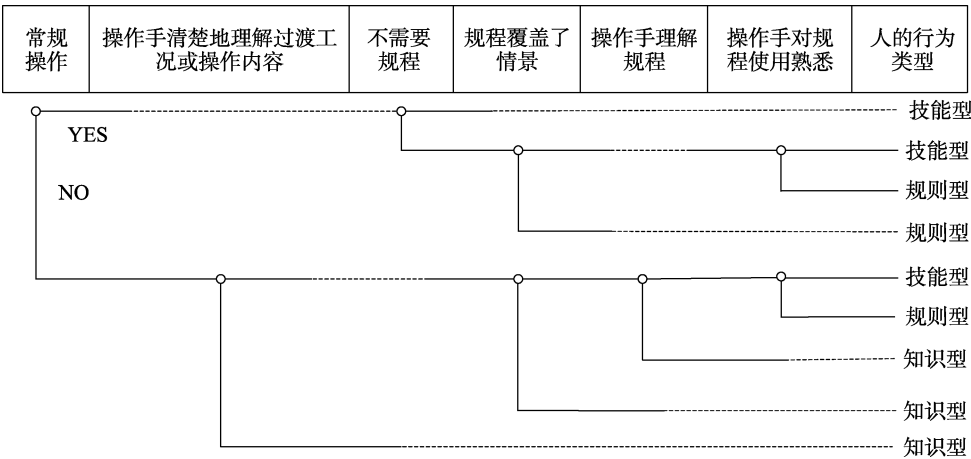


图 1 HCR 行为层次识别树
Fig.1 HCR behavioral hierarchy recognition tree

其掌握规程,运用相关制度,严格按照当时的工况场景,根据事先拟制的安全响应机制、应对措施等采取相应动作,则这类行为应划归为基于规则的行为。这些行为因要作选择、决定或判断,人为失误率会增大,特别是现场操作,如果操作人员所采取的行为不熟悉,失误率将增大,且决定时间将增加。

基于知识的行为(K):面对十分复杂的、或从未遇到过的异常情况,操作人员将运用所掌握的基本知识、原理、通用法则等判断、处理,处理结果取决于操作人员对系统相关知识的全面理解,对系统当前状态的综合判断,结合培训程度、运用机制和当前工况综合判断,采取应对措施和处置方法,这类行为应划归为基于知识的行为。

1.2 响应失误概率^[19-21]

根据 HCR 模型假设,基于 3 参数的威布尔分布函数,构建操作员在时间 t 的操作响应失误概率 $P(t)$ 仅与允许时间(t)和执行时间($T_{1/2}$)的比值有关。基于 3 参数的威布尔分布函数,构建时间 t 的响应失误概率 $P(t)$ 模型如下:

$$P(t) = e^{-\left(\frac{t/T_{1/2}-\gamma}{\alpha}\right)^\beta} \quad (1)$$

式中: $T_{1/2}$ 为操作者完成任务的中值时间; α 、 β 、 γ 为修正系数,即尺度参数(特征响应时)、形状参数和位置参数(最小响应时)。

由于操作人员的执行时间可能因学识水平、训练熟练程度、心理承受能力等各类情况而有所不同,故在使用公式之前要用修正因子修正操作者完成任务的中值时间 $T_{1/2}$ 。在 HCR 模式中所考虑的关键行为形成因子(PSF)有 3 个:操作经验(K_1)、心理压力(K_2)及人机界面(K_3)。修正的公式为:

$$T_{1/2} = T_{1/2,n}(1+K_1)(1+K_2)(1+K_3) \quad (2)$$

式中: $T_{1/2,n}$ 为训练或实际操作过程中统计时间; K_1 、 K_2 、 K_3 为操作经验、心理压力、人机界面等行为类别响应的修正因子对应的修正系数。

α 、 β 、 γ 是由数据归纳而得到的与行为类型有关的参数,他们服从威尔分布。 α 、 β 、 γ 和 K_1 、 K_2 、 K_3 参数通过模拟训练机训练得到数据,通过表 1,2 查取^[13]。

表 1 参数 α 、 β 、 γ 的选取
Tab.1 Selection of parameters α , β and γ

行为类型	α	β	γ
技能型	0.407	1.2	0.7
规则型	0.601	0.9	0.6
知识型	0.791	0.8	0.5

表 2 HCR 模型的行为形成因子和相关的系数
Tab.2 Behavioral factors and associated coefficients of the HCR model

形成因子		系数
操作经验 K_1	专家, 受过很好训练	-0.22
	平均训练水平	0.00
	新手, 最小训练水平	0.44
心理压力 K_2	严重应急情景	0.44
	潜在应急情景/高负荷工作	0.28
	最佳应急情景/正常	0.00
	低度应急/放松情况	0.28
人机界面 K_3	优秀	-0.22
	好	0.00
	一般	0.44
	低劣	0.78
	极端低劣	0.92

2 破甲战斗部模拟动破甲试验过程 人因可靠性研究

破甲战斗部模拟动破甲试验时,利用火箭橇将战斗部加速至规定速度,以规定的交会条件撞击靶标,考核战斗部动破甲威力^[22-23]。其试验流程如图 2 所示,具体操作见表 3。

轨道、靶标、橇车准备完成后,布设、调试测试设备。试验场地确认安全后,将橇车推至指定发射点。将战斗部(常、高、低温条件下)按技术要求安装在橇车上。火箭发动机安装到合适位置后,除发动机点火、接线人员外,其余人员均撤离现场。火箭发动机点火回路内阻检测合格后,连接火箭发动机点火线缆,现场所有人员随即撤离到点火位置或安全区域。检测战斗部引信保险回路正常后,引信保险加电,解除引信保险。确认引信保险解除后,测试设备复原。发射电路通电后,检测电压/电流正常后,确认全系统技术状态,按发射口令发射。火箭橇发射后,火箭发动机推动橇车加速,橇车加速至指定速度后,战斗部以规定速度和姿态撞击靶标。试验结束后,保存测试数据,记录试验现场靶标穿透情况及后效靶情况,确认轨道、测试设备等参试设备完好无损后,组织撤收,编写试验报告。根据试验流程,分解操纵指令允许操作时间,并记录主要操纵指令的操作动作完成任务时间,得到试验过程中的重要响应动作及行为类型,见表 4。

3 人因失误概率计算

根据 HCR 模型,操作者完成任务的中值时间 $T_{1/2}$ 和允许操作时间 t 确定以后,就可以按照以式(1)和

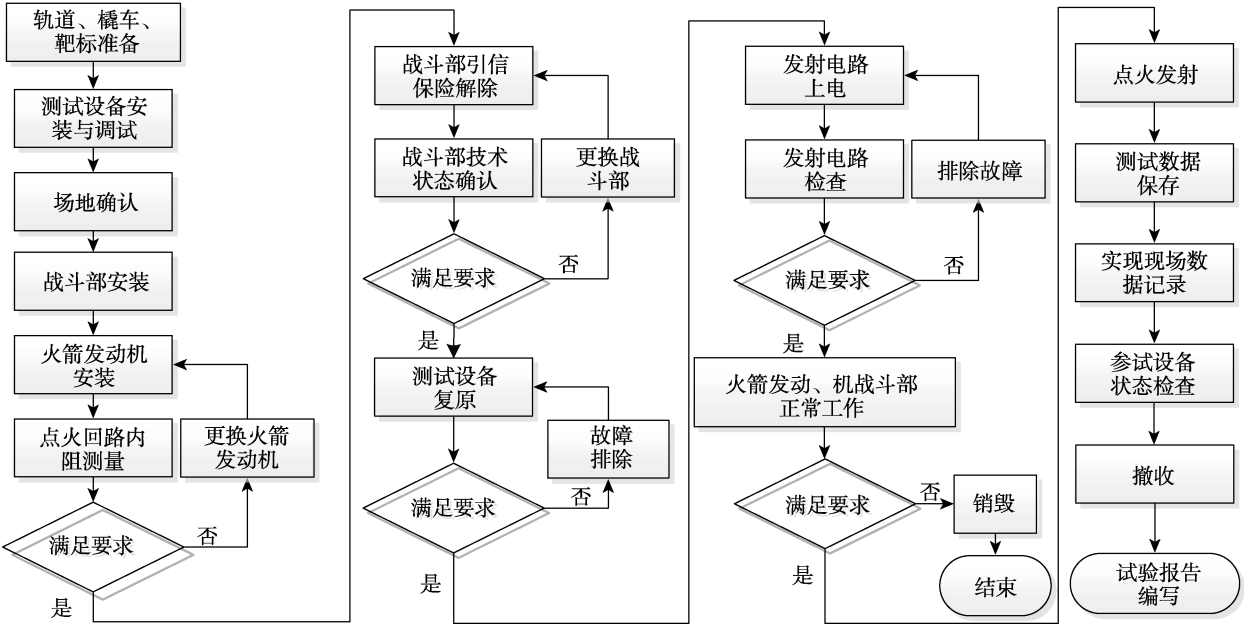


图 2 破甲战斗部模拟动破甲试验流程
Fig.2 Simulated dynamic armorpiercing test flow of armor piercing warheads

表 3 试验过程操作动作
Tab.3 Experimental procedure and operation action

序号	操纵指令	操作动作
1	轨道、橇车、靶标准备	轨道测量调整、橇车技术状态检查、靶标布设
2	测试设备安装与调试	测试设备安装与调试
3	战斗部安装	战斗部安装角度测量，紧固
4	火箭发动机安装	火箭发动机安装角度测量，紧固；点火具内阻测量；发射导线连接，发射回路电阻测量；发射导线短接
5	战斗部引信保险解除	引信保险解除线路连接，保险开关上电，回路电阻测量、回路电压测量
6	测试设备仪器复原	测试设备上电，复原
7	发射	发射导线连接；电源开关打开，发射保险打开，发射电压、电流检测，按口令发射；若火箭发动机和战斗部工作正常，记录测量数据；
8	异常燃爆品销毁	若火箭发动机或战斗部工作异常，组织异常火箭发动机或战斗部销毁
9	参试设备状态检查	检查轨道技术状态和参试设备技术状态
10	撤收	撤收试验物资和参试设备

表 4 重要响应动作及行为类型
Tab.4 Major response actions and behavior types

操纵指令	重要响应动作	行为类型
战斗部安装	战斗部安装角度测量，紧固	规则型，根据战斗部安装技术要求和战斗部安装操作规程操作
火箭发动机安装	火箭发动机安装角度测量；点火具内阻测量；发射回路电阻测量	规则型，根据火箭发动机安装技术要求、火箭发动机内阻测量规程操作
战斗部引信保险解除	引信保险解除线路连接，保险开关上电，回路电阻测量、回路电压测量	规则型，根据战斗部引信保险解除操作规程操作
发射	发射导线连接；电源开关打开，发射保险打开，发射电压、电流检测，按口令发射	规则型，根据发射流程和发射电路检测操作规程操作
异常燃爆品销毁	若火箭发动机和战斗部工作正常，记录测量数据；若火箭发动机或战斗部工作异常，组织异常火箭发动机或战斗部销毁	知识型，根据橇车速度、试验视频等综合判断火箭发动机和战斗部工作情况，若火箭发动机或战斗部工作异常，则需根据异常燃爆品销毁规程和现场实际情况处置

(2) 计算响应失误概率。HCR 模型通过响应失误概率反映人的可靠性, 响应失误概率越大, 完成该动作时人的可靠性越低。

具体的评估步骤如下^[24-25]:

1) 根据试验流程、试验场地要求和试验次数等确定允许操作时间 t 。

2) 根据操作人员综合素质和试验过程中的重要响应动作, 确定操作人员操作经验、心理压力、人机界面响应等行为类别的修正因子, 确定修正系数。

3) 根据操作人员日常训练和实际试验过程中重要响应动作统计数据, 确定操作者完成任务的中值时间 $T_{1/2,n}$ 。

4) 通过 HCR 模型, 计算试验过程的响应失误概率, 评估破甲战斗部模拟动破甲试验人因可靠性。

5) 根据响应失误概率, 分析具体原因。

综合试验流程、试验场地要求和试验次数要求, 按每天 (8 h) 试验 1 次计算, 每次试验总时间为 8 h, 轨道、撬车、靶标准备时间 2 h, 战斗部安装至发射时间共 4 h, 试验结束后, 数据采集、测量时间共为 2 h。其中, 战斗部保险解除后 5 min 内撬车必须发射, 否则引信启动电压过低, 可能导致战斗部无法正常工作。对 15 次模拟试验和 5 正式试验中 5 个岗位完成任务中值时间进行统计, 战斗部安装、引信保险解除、异常燃爆品销毁操作训较少, 操作经验按新手取值; 引信保险解除和异常燃爆品销毁时风险较高, 操作人员心理压力较大, 按严重应急场景取值; 异常燃爆品销毁时场景复杂, 人机界面按极端低劣取值。由此得到试验过程中重要响应动作允许操作时间见表 5。

表 5 重要响应动作响应失误概率
Tab.5 Major response action response error probability

重要响应动作	允许操作时间 t/min	完成任务中值时间 $T_{1/2,n}/\text{min}$	操作经验 K_1	心理压力 K_2	人机界面 K_3	完成任务中值修正时间 $T_{1/2}/\text{min}$	响应失误概率 $P(t)$
战斗部安装	60	10.4	0.44	0.28	0.44	27.603 76	0.230
火箭发动机安装	30	9.0	-0.22	0.28	0	8.985 6	0.117
引信保险解除	25	7.0	0.44	0.44	0.78	25.837 06	0.503
发射	5	3.0	-0.22	0.28	-0.22	2.336 256	0.143
异常燃爆品销毁	120	40.0	0.44	0.44	0.92	159.252 5	0.521

通过计算可知, 异常燃爆品销毁和引信保险解除是响应失误概率较高的 2 个操作。战斗部安装、发射和火箭发动机安装响应失误概率也在 10% 以上。

4 影响因素分析

4.1 允许操作时间

根据上述计算结果, 取 t 与 $T_{1/2}$ 比值的对数为图中的横坐标, 取 $P(t)$ 的对数为图中的纵坐标, 得到 $\lg(t/T_{1/2})-\lg[P(t)]$ 曲线, 如图 3 所示。从拟合曲线可看出, 操作人员的响应失误概率随动作允许时间 t 与完成操作的中值修正时间 $T_{1/2}$ 的比值的变化而变化。从图 3 中可以看出, 人因操作可靠性随动作允许时间 t 的增加而提高, 随完成操作中值修正时间 $T_{1/2}$ 的增加而降低。

按每天 (8 h) 试验 1 次计算, 战斗部安装至发射时间共 8 h, 轨道、撬车、靶标试验前一天准备, 数据采集、测量试验结束后开展。允许操作时间增加 2 倍后, 重要响应动作响应失误概率见表 6。

异常燃爆品销毁、引信保险解除、战斗部安装响应失误概率最少降低 45.6% (战斗部安装) 降低, 但战斗部安装、引信保险解除、异常燃爆品销毁的响应失误概率仍在 15% 以上, 属于高失误概率。由此可见, 单纯增加允许操作时间不能将人因响应失误概率降

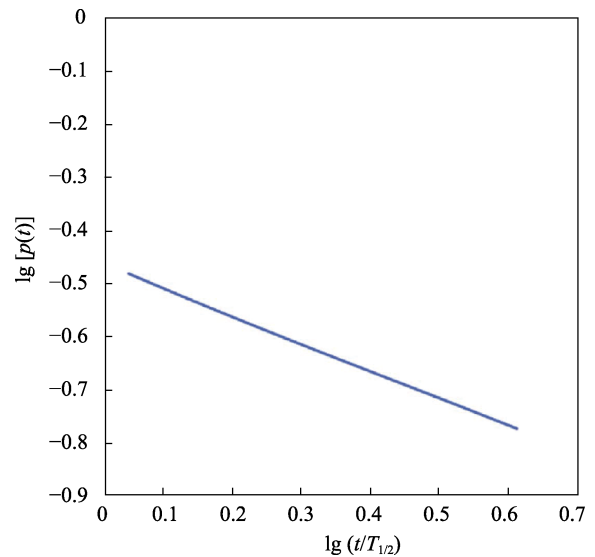


图 3 $\lg(t/T_{1/2})-\lg[P(t)]$ 曲线
Fig.3 $\lg(t/T_{1/2})-\lg[P(t)]$ curve chart

低至允许范围内。

4.2 修正系数

对于操作经验、心理压力和人机界面修正系数, 在引信保险解除、异常燃爆品销毁等操作中, 操作人员心理压力较大, 心理压力修正系数难以优化调整, 但通过开展针对性培训和人机交互界面优化后, 操作

经验和人机界面修正系数可以优化。如通过外请专业技术人员授课、开展操作性培训后, 操作人员操作经验可达专家, 受过很好训练水平, 完成任务中值时间减少, 同时操作经验行为系数可取-0.22; 通过引信保险解除线缆分类标识、颜色规范等方法可优化引信保险解除人机界面行为系数, 可取 0; 通过改进异常

燃爆品销毁方法, 人机界面行为系数也可取 0。在保证试验效率同时, 不增加允许操作时间, 修正系数优化后, 重要响应动作响应失误概率见表 7。异常燃爆品销毁、引信保险解除、战斗部安装等 3 个响应失误概率较高的操作, 响应失误概率至 10%以下, 满足安全操作使用要求。

表 6 重要响应动作响应失误概率 (2t)
Tab.6 Major response action response error probability (2t)

重要响应动作	允许操作 时间 t/min	完成任务中值 时间 $T_{1/2,n}/\text{min}$	操作经验 K_1	心理压力 K_2	人机界面 K_3	完成任务中值修 正时间 $T_{1/2}/\text{min}$	响应失误 概率 $P(t)$
战斗部安装	120	10.4	0.44	0.28	0.44	27.603 76	0.158
火箭发动机安装	60	9.0	-0.22	0.28	0	8.985 6	0.074
引信保险解除	50	7.0	0.44	0.44	0.78	25.837 06	0.217
发射	10	3.0	-0.22	0.28	-0.22	2.336 256	0.097
异常燃爆品销毁	240	40.0	0.44	0.44	0.92	159.252 5	0.321

表 7 重要响应动作响应失误概率 (修正系数优化)
Tab.7 Major response action response error probability (modified coefficient optimization)

重要响应动作	允许操作 时间 t/min	完成任务中值 时间 $T_{1/2,n}/\text{min}$	操作经验 K_1	心理压力 K_2	人机界 面 K_3	完成任务中值修 正时间 $T_{1/2}/\text{min}$	响应失误 概率 $P(t)$
战斗部安装	60	8.2	-0.22	0.28	-0.22	6.385 766	0.056
火箭发动机安装	30	7.0	-0.22	0.28	-0.22	5.451 264	0.083
引信保险解除	25	7.0	-0.22	0.44	0	7.862 4	0.039
发射	5	1.0	-0.22	0.28	-0.22	0.778 752	0.075
异常燃爆品销毁	120	30.0	-0.22	0.44	0	33.696	0.033

5 结论

从重要响应动作响应失误概率计算结果可以看出, 战斗部安装、引信保险解除、异常燃爆品销毁操作训较少, 操作经验不足, 引信保险解除和异常燃爆品销毁时, 连接线路复杂, 线缆分类不清、难辨识, 人机界面交互性差是导致重要响应动作响应失误概率高的主要原因, 因此在人因失误预防和控制方面可采取以下措施:

1) 开展专业培训, 增加操作经验。训练次数的增加, 不仅可以提高操作人员的操作经验, 而且能提高其心理承受能力, 降低行为形成因子修正系数, 减小各重要响应动作响应失误概率。如通过理论知识培训, 使操作人员掌握战斗部安装、火箭发动机安装、引信保险解除、发射、异常燃爆品销毁等重要响应动作的正确操作方法和常见问题应对措施; 通过技能训练, 提升操作人员安装、检测等操作技能; 通过应急处置训练, 培养操作人员更换发动机、销毁异常燃爆品的应急反应能力和处置能力。

2) 精心准备, 优化人机界面。人机界面交互性好时, 不仅能提高效率, 而且能有效降低人因失误概率。如在战斗部安装和火箭发动机安装前, 在试验准

备阶段, 将检测线缆提前分类固定, 标识线缆用途, 并以颜色或线型区分功能, 不仅能提高安装效率, 而且能有效降低人因失误概率。引信保险解除和异常燃爆品销毁时, 线缆连接复杂、操作人员面对危险和复杂场景时操作压力大, 更应该精心准备, 尽量减少现场操作或故障排除时操作程序, 降低响应失误概率。

3) 增加试验准备和完成时间, 适当延长个别重要响应动作的允许操作时间。对于危险性高的引信保险解除、异常燃爆品销毁等操作, 应适当延长允许操作时间, 尽量减小操作人员心理压力, 提高人员操作可靠性。

在某型破甲战斗部模拟动破甲试验中, 由于试验准备不细致, 操作培训次数较少, 在引信保险解除操作中出现了线路连接不可靠故障, 经过增加培训、优化线缆分类方法后, 操作人员完成任务效率和可靠性均有了较大提高。

参考文献:

[1] 王守仁, 任晓鹏, 杨丽, 等. 破甲随进杀伤战斗部威力性能研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(7): 185-190.
WANG S R, REN X P, YANG L, et al. Study on Power Performance of Amor Penetration Accompanying Lethal

- Warhead[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(7): 185-190.
- [2] 张俊, 刘荣忠, 郭锐, 等. 破甲杀伤复合战斗部仿真研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(12): 34-37.
ZHANG J, LIU R Z, GUO R, et al. Simulation Study on Anti-Armor and Anti-Personnel Composite Warhead[J]. Computer Simulation, 2012, 29(12): 34-37.
- [3] 韩文斌, 张国伟, 邵彬, 等. 药型罩锥角对破片飞散的影响[J]. 爆破器材, 2020, 49(1): 18-23.
HAN W B, ZHANG G W, SHAO B, et al. Effect of Cone Angle of Shaped Liner on Fragment Dispersion[J]. Explosive Materials, 2020, 49(1): 18-23.
- [4] 龚柏林, 王可慧, 初哲, 等. EFP 战斗部破片场复合技术研究[J]. 弹道学报, 2015, 27(1): 76-79.
GONG B L, WANG K H, CHU Z, et al. Research on Forming Technology of Composite Fragments Field of EFP[J]. Journal of Ballistics, 2015, 27(1): 76-79.
- [5] 赵飞扬, 王志军, 尹建平, 等. 预制破片/MEFP 组合式战斗部数值仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(12): 52-56.
ZHAO F Y, WANG Z J, YIN J P, et al. Numerical Simulation of Prefabricated Fragment/MEFP Combat Warhead[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(12): 52-56.
- [6] 黄佳, 张昭, 张洪武. 聚能射流形成数值模拟[J]. 计算力学学报, 2013, 30(S1): 88-91.
HUANG J, ZHANG Z, ZHANG H W. Numerical Simulation of Shaped Charge Formation[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2013, 30(S1): 88-91.
- [7] 吴晗玲, 段卓平, 汪永庆. 杆式射流形成的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(4): 328-332.
WU H L, DUAN Z P, WANG Y Q. Simulation Investigation of Rod-Like Jets[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(4): 328-332.
- [8] 王艳艳, 孙浩, 李建昌, 等. 火箭橇终点效应试验战斗部靶后落点定位测试方法[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(S1): 256-259.
WANG Y Y, SUN H, LI J C, et al. Test Methods of Warhead Target Backfall Positioning for Rocket Skid End Effect Tests[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(S1): 256-259.
- [9] 董治华, 肖军, 张林锐, 等. 火箭橇减振系统设计[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(8): 15-20.
DONG Z H, XIAO J, ZHANG L R, et al. Vibration Damping System Design for Rocket Sled[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(8): 15-20.
- [10] 肖军, 章玮玮, 陈炜, 等. 高速双轨橇车用固体火箭发动机动力学分析[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(1): 91-93.
XIAO J, ZHANG W W, CHEN W, et al. Dynamic Analysis of Solid Rocket Engine for High Speed Double Track Sled[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(1): 91-93.
- [11] 谢红卫, 孙志强, 李欣欣, 等. 典型人因可靠性分析法评述[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(2): 101-107.
XIE H W, SUN Z Q, LI X X, et al. An Overview of Typical Methods for Human Reliability Analysis[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29(2): 101-107.
- [12] 王遥, 沈祖培. CREAM——第二代人因可靠性分析方法[J]. 工业工程与管理, 2005, 10(3): 17-21.
WANG Y, SHEN Z P. CREAM—A Second-Generation Human Reliability Analysis Method[J]. Industrial Engineering and Management, 2005, 10(3): 17-21.
- [13] 张力, 黄曙东, 何爱武, 等. 人因可靠性分析方法[J]. 中国安全科学学报, 2001, 11(3): 11.
ZHANG L, HUANG S D, HE A W, et al. Methods for Human Reliability Analysis[J]. China Safety Science Journal, 2001, 11(3): 11.
- [14] 姜菲菲, 黄明, 江福才. 基于 CREAM 的船舶引航员人因可靠性预测研究[J]. 交通信息与安全, 2017, 35(3): 26-33.
JIANG F F, HUANG M, JIANG F C. Human Reliability Prediction for Ship Pilot Based on Modified CREAM[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2017, 35(3): 26-33.
- [15] 田彬, 胡瑾秋, 王海涛, 等. 页岩气压裂作业人因失误结构化辨识方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(2): 128-134.
TIAN B, HU J Q, WANG H T, et al. A Structured Method for Identifying Human Error in Shale Gas Fracturing[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(2): 128-134.
- [16] 张爱琳, 刘晓佳. 改进 CREAM 模型的船舶引航员人因可靠性预测[J]. 中国航海, 2021, 44(1): 32-37.
ZHANG A L, LIU X J. Improved CREAM Model for Prediction of Human Reliability Concerning Harbor Pilots[J]. Navigation of China, 2021, 44(1): 32-37.
- [17] 施金斌, 刘晓佳, 马国旺, 等. 基于改进认知可靠性与失误分析方法的隧道驾驶人因可靠性分析模型[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(25): 10983-10989.
SHI J B, LIU X J, MA G W, et al. Human Reliability Analysis Model for Tunnel Driving Based on Improved CREAM Method[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(25): 10983-10989.
- [18] 林枫, 王洁, 李卫军. 地铁行车调度班组应急响应中的人因失误研究[J]. 安全, 2015, 36(2): 25-28.
LIN F, WANG J, LI W J. Study on Human Error in Emergency Response of Metro Traffic Dispatching Team[J]. Safety, 2015, 36(2): 25-28.
- [19] 吴昊. 船舶引航员人因可靠性研究[J]. 珠江水运, 2022(20): 84-86.
WU H. Study on Human Reliability of Ship Pilots[J]. Pearl River Water Transport, 2022(20): 84-86.
- [20] 孙鑫. 基于 CREAM 的船舶引航员人因可靠性的预测研究[J]. 珠江水运, 2021(22): 81-82.
- [21] 高文宇, 张力. 人因可靠性分析方法 CREAM 及其应用研究[J]. 人类工效学, 2002, 8(4): 8-12.
GAO W Y, ZHANG L. Second Generation HRA Method

- CREAM and Its Applied Research[J]. Chinese Ergonomics, 2002, 8(4): 8-12.
- [22] 肖军, 耿强, 徐进欣, 等. 常规兵器火箭橇试验速度影响因素分析[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(3): 83-87.
XIAO J, GENG Q, XU J X, et al. Research on Aerodynamic Drag Coefficients of Double-Track Rocket Sled Study[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(3): 83-87.
- [23] 肖军, 章玮玮, 耿强, 等. 火箭橇水刹车高速入水载荷特性数值研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(S1): 18-21.
XIAO J, ZHANG W W, GENG Q, et al. Characteristic Study of Water Entry of Rocket Sled Brake at High Speed[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(S1): 18-21.
- [24] 马彦辉, 左凯瑛, 王颖, 等. 人因可靠性评价的改进加权 BN-CREAM 模型[J]. 工业工程, 2023, 26(6): 83-92.
MA Y H, ZUO K Y, WANG Y, et al. An Improved Weighted BN-CREAM Model for Human Reliability Analysis[J]. Industrial Engineering Journal, 2023, 26(6): 83-92.
- [25] 陈宇, 朱海燕, 刘志钢, 等. 基于人因可靠性的道岔失表故障处置量化分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(1): 131-134.
CHEN Y, ZHU H Y, LIU Z G, et al. Quantitative Analysis of Turnout Loss of Indication Fault Disposal Based on Human Factor Reliability[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(1): 131-134.