

doi: 10.7690/bgzd.2016.09.003

基于 CREAM 的航天发射场人因可靠性定量分析方法

马昕晖¹, 姜 曙², 尚 晨³

- (1. 中国人民解放军装备学院航天装备系, 北京 101416;
2. 中国人民解放军装备学院研究生管理大队, 北京 101416;
3. 中国人民解放军海军 92198 部队, 辽宁 葫芦岛 125100)

摘要: 为准确得到航天发射场人因失误概率, 以我国航天发射场安全评估为背景, 基于认知可靠性和失误分析方法, 开展航天发射场人因可靠性定量分析方法研究。结合航天发射场特点对共同绩效条件(common performance condition, CPC)进行改进, 采用模糊方法处理 CPC 到控制模式之间的映射关系, 提出环境影响因子值的概念, 建立航天发射场 HRA 定量分析流程, 并针对火箭吊装过程进行了实例分析。分析结果表明: 该方法能够准确计算航天发射场任务作业中的人因失误概率, 可为航天发射场人员安全分析提供理论基础和参考。

关键词: 航天发射场; 人因可靠性; 认知可靠性和失误分析方法; 共同绩效条件

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

Quantitative Analysis Method of Human Reliability in Launching Base Based on CREAM

Ma Xinhui¹, Jiang Shu², Shang Chen³

- (1. Department of Space Equipment, Equipment Academy of PLA, Beijing 101416, China;
2. Administrant Brigade of Postgraduate, Equipment Academy of PLA, Beijing 101416, China;
3. No. 92198 Unit of PLA Navy, Huludao 125100, China)

Abstract: In order to get the human error probability of the launching base precisely, taken safety evaluation of launching base as background, based on the cognitive reliability and error analysis method (CREAM), the launching base human reliability analysis (HRA) was studied in quantify. Firstly, the common performance condition (CPC) is improved in consideration of the launching base. Secondly, the mapping relation from CPC to control model is disposed using a fuzzy method, then the conception of condition effect factor and the HRA flow process of launching base are proposed. Finally, the process of the rocket lifting is analysis as an example. The results show this method can calculates the human error probability of launching base precisely, and also provides theoretical basis and reference for human safety analysis of launching base.

Keywords: launching base; human reliability analysis; cognitive reliability and error analysis method; common performance condition

0 引言

随着我国航天事业的快速发展, 发射场航天发射任务呈现出“新技术、高密度、并行化”的新形势。航天发射场是进行航天测试发射的依托基地, 是航天产品最后的质量检验部门, 是航天服务生产的具体实施单位。发射场的安全性关乎航天任务的成败。而且在航天发射任务活动中, 尽管系统的自动化程度提高了, 但归根结底还需要人来控制操作, 需要人来设计、制造、维修, 需要人来决策。航天发射也是一项高科技的探险活动, 发生在航天发射场的任何故障和人因失误, 都会影响航天任务的完成和人员安全; 因此, 急需针对航天发射场人因失误行为进行分析, 建立完整的航天发射场人因可靠

性分析流程, 进行事故原因追溯性分析和人因失误概率预测, 并为发射场定量风险评估提供数据基础。

据 19 世纪 70 年代的统计资料, 美国航天器和武器系统的重大事故中, 有 50%~70% 由人为失误引起^[1]。1967 年 1 月, 阿波罗 1 号飞船在实验台上起火, 3 名宇航员丧生, 原因是飞船的设计和生产错误; 1986 年 1 月, 美国挑战者号航天飞机起飞 73 s 后爆炸, 机毁人亡, 主要是管理不善和决策失误造成的^[2]。在发现人误行为对航天事故的影响之后, 西方开始盛行一种人因可靠性 (human reliability analysis, HRA) 研究^[3], 该学科在航天事故分析中起到了“手术刀”的作用, 并正在成为宇航和国防工业安全生产中杜绝人为失误的防火墙。

收稿日期: 2016-05-24; 修回日期: 2016-06-30

作者简介: 马昕晖(1969—), 女, 吉林人, 硕士, 副教授, 从事航天系统安全性与可靠性研究。

因此，笔者以我国航天发射场为背景，基于 HRA 方法中的认知可靠性和失误分析方法 (cognitive reliability and error analysis method, CREAM)，研究航天发射场 HRA 定量分析方法。

1 航天发射场 HRA 方法研究思路

Erik Hollnagel 于 1998 年提出 CREAM 方法，该方法强调人在生产活动中的绩效输出不是孤立的随机行为，而是依赖于人完成任务时所处的情景环境或工作条件。他提出用 9 类因素来表现任务所处的情景环境，统称为共同绩效条件 (common performance condition, CPC)，包括组织管理的完善性、工作条件、人机界面与运行支持的完善性、规程/计划的可用性、同时出现目标的数量、可用时

间、值班区间(生理节奏)、培训和经验的充分性、班组成员的合作质量。通过对 CPC 的等级描述，来得到人在该环境下可能的人员认知控制模式，即战略型、战术型、机会型和混乱型，每一种控制模式对应一个概率区间，来表示某一个确定环境中的人员可靠性。对于具体任务中的人员失误概率 (human error probability, HEP)，则通过任务分解确定人员的基本失误概率，之后用 CPC 评价得到的修正值对基本失误概率进行修正^[4-5]。

但是，由于 CREAM 方法源自于核电领域，与航天领域存在显著差异，原有方法中所提出的 CPC 并不能直接用于航天发射场的人因可靠性分析；因此，笔者在统计分析航天事故原因之后，将原 CPC 调整为 10 类，如表 1 所示。

表 1 改进后的 CPC 及主要组成

CPC 名称及编号	主要组成	等级	期望效应
组织管理(C ₁)	主要包括指挥文书的完善性、组织结构的合理性、双岗四检查制度的落实情况、应急规程、考核评定严格度。	非常有效	改进
		有效	不显著
		无效	降低
		效果差	降低
航天文化(C ₂)	主要包括试验作风、角色意识、安全意识。	有效	改进
		合适	不显著
		不合适	降低
培训程度及经验水平(C ₃)	主要包括处理重大事故的经验、考核成绩、考核周期、本岗位无差错工作年限、岗位训练频度。	足够且丰富	改进
		不够, 不丰富	不显著
		不足	降低
个人心理生理状态(C ₄)	主要包括个人健康状况、疲劳程度、官兵个人问题和家庭困难、是否有完成重大任务的经历。	优秀	改进
		良好	不显著
		一般	不显著
		较差	降低
工作条件(C ₅)	主要包括噪声振动干扰、温度和湿度、空气质量、照明条件、有毒物质污染情况。	满意	改进
		可接受	不显著
		不满意	降低
指挥协同能力(C ₆)	主要包括双岗实时指导、上下级沟通质量、口令清晰度、团队配置。	优秀	改进
		良好	不显著
		一般	不显著
		较差	降低
二岗人员监督能力(C ₇)	主要包括二岗人员工作年限、二岗人员执行力度、二岗人员警惕性。	有效	改进
		合适	不显著
		不合适	降低
任务特性(C ₈)	主要包括任务的复杂程度、任务可用时间、同一时间任务数量、任务频度。	较轻松	改进
		正常水平	不显著
		难度较大	降低
指挥手段的合理性(C ₉)	主要包括沟通的即时性、设备的智能程度、架设是否方便、可视画面是否清晰。	合理	改进
		正常	不显著
		不合理	降低
人机交互界面(C ₁₀)	主要包括设备形状与颜色的合理性、设备的防容错率设计、设备自动化程度、设备数字化水平。	支持度高	改进
		完善	不显著
		可接受	不显著
		不适合	降低

控制模式通过对 CPC 的评价水平对应的期望效应得出，改进后的 CPC 对应的控制模式如图 1 所示。 $\sum_{改进}$ 表示对应期望效应为改进的 CPC 数目之和； $\sum_{降低}$ 表示对应期望效应为降低的 CPC 数目之和。

从基本方法的应用情况来看，原有方法中采用查表的方式得出 CPC 权重因子，对基本失误概率进行修正，该过程中的数据均来自于核电厂，显然无法直接移植；因此，笔者采用模糊方法处理 CPC 到

控制模式的映射关系。

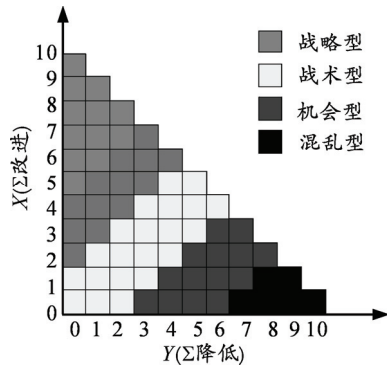


图 1 CPC 对应控制模式

2 基于模糊理论的 CREAM

CREAM 方法的基础数据需要由专家或对操作过程熟悉的人员对 10 类 CPC 进行评估完成，之后对其进行模糊处理，模糊处理可得到任务情景对应控制模式中的概率值。模糊处理的具体流程主要分为模糊集的处理、模糊规则建立、去模糊化 3 步。

2.1 CPC 与控制模式之间的模糊集建立

为了更好地描述输入参数的影响，笔者采用 3~4 个模糊子集来进行描述，每类 CPC 模糊集的论域 (UOD) 取值为 [0,100]，如表 2 所示。

表 2 改进后 CPC 模糊集

CPC 名称及编号	论域	模糊子集的区间			
		效果差	无效	有效	非常有效
组织管理(C ₁)	[0,100]	0~25	10~60	40~90	75~100
航天文化(C ₂)	[0,100]	不合适 0~30	合适 20~80	有效 70~100	
培训程度及经验水平(C ₃)	[0,100]	不足够 0~30	足够, 不丰富 20~80	足够且丰富 70~100	
个人心理生理状态(C ₄)	[0,100]	较差 0~25	一般 10~60	良好 40~90	优秀 75~100
工作条件(C ₅)	[0,100]	不满意 0~30	可接受 20~80	满意 70~100	
指挥协同能力(C ₆)	[0,100]	较差 0~25	一般 10~60	良好 40~90	优秀 75~100
二岗人员监督能力(C ₇)	[0,100]	不合适 0~30	合适 20~80	有效 70~100	
任务特性(C ₈)	[0,100]	难度较大 0~30	正常水平 20~80	较轻松 70~100	
指挥手段合理性(C ₉)	[0,100]	不合理 0~30	正常 20~80	合理 70~100	
人机交互界面(C ₁₀)	[0,100]	不适合 0~25	可接受 10~60	完善 40~90	支持度高 75~100

CPC 的量化值与隶属度通过隶属函数连接，在隶属函数的选择上，选择高斯型 c 隶属度函数，即

$$f(x, \delta, c) = \exp\left[-\frac{(x-c)^2}{2\delta^2}\right]. \quad (1)$$

笔者根据表 2 及参考文献的研究^[6]，确定了式 (1) 中参数 c 、 σ 的大小，进而得到 CPC 评价水平的隶属度函数，表示为 $\mu X_{kj}(x_k)$ ， j 将在下文进行描述。3 个模糊子集与 4 个模糊子集的 CPC 隶属度函数略有区别^[7]，分别为：

$$\mu X_{kj}(x_k) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{x^2}{2 \times 18^2}\right) & x \in [0, 30] \\ \exp\left(-\frac{(x-50)^2}{2 \times 18^2}\right) & x \in [20, 80], (k=2, 3, 5, 7, 8, 9); \\ \exp\left(-\frac{(x-100)^2}{2 \times 18^2}\right) & x \in [70, 100] \end{cases}; \quad (2)$$

$$\mu X_{kj}(x_k) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{x^2}{2 \times 15^2}\right) & x \in [0, 25] \\ \exp\left(-\frac{(x-35)^2}{2 \times 15^2}\right) & x \in [10, 60] \\ \exp\left(-\frac{(x-65)^2}{2 \times 15^2}\right) & x \in [40, 90] \\ \exp\left(-\frac{(x-85)^2}{2 \times 15^2}\right) & x \in [70, 100] \end{cases}, (k=1, 4, 6, 10). \quad (3)$$

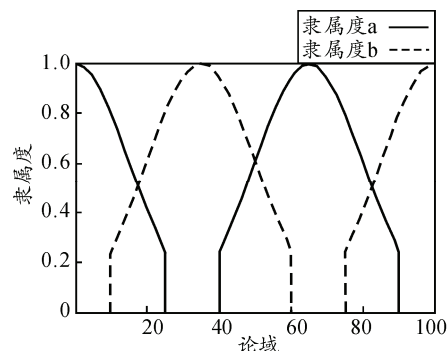
此外，为了计算简便，CPC 的隶属度函数曲线图在隶属度为 0.25 处对函数进行了截断^[8]，如图 2。

如前文中提到，4 类控制模式的概率区间为 $0.5 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^0$ ，对应的隶属度函数用 $\mu Z_i(z)$ 来表示， $i=1, 2, 3, 4$ 依次代表战略型、战术型、机会型、混乱型，论域 (UOD) 为 $[0.5 \times 10^{-5}, 1.0 \times 10^0]$ 。每类控制模式都对应一个失误概率区间，同样采用高斯隶

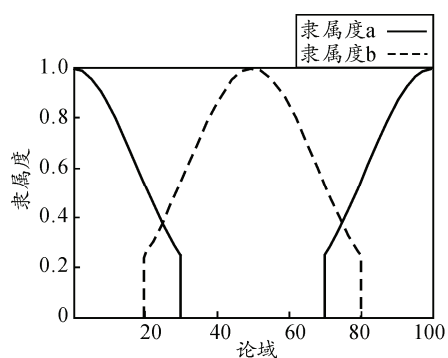
属度函数，在隶属度为 0.25 处截断；同时为了计算简便，统一对失误概率取以 10 为底的对数，可以得

$$\mu_{Z_i}(z) = \begin{cases} \mu_{Z_1}(z) = \exp\left(-\frac{(x - (-3.65))^2}{2 \times 0.99^2}\right) & x \in [-5.3, -2.0] \\ \mu_{Z_2}(z) = \exp\left(-\frac{(x - (-2))^2}{2 \times 0.6^2}\right) & x \in [-3.0, -1.0] \\ \mu_{Z_3}(z) = \exp\left(-\frac{(x - (-1.15))^2}{2 \times 0.51^2}\right) & x \in [-2.0, -0.3] \\ \mu_{Z_4}(z) = \exp\left(-\frac{(x - (-0.5))^2}{2 \times 0.3^2}\right) & x \in [-1, 0] \end{cases}, (i=1,2,3,4)。 \quad (4)$$

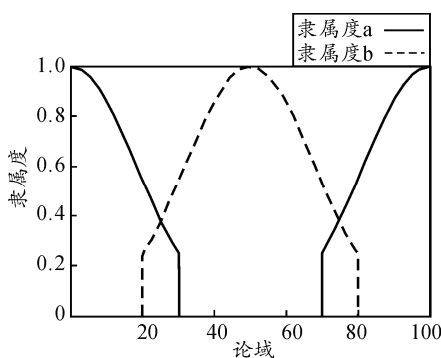
到对应的隶属度函数如式 (4)，其对应的隶属度函数曲线如图 3 所示。



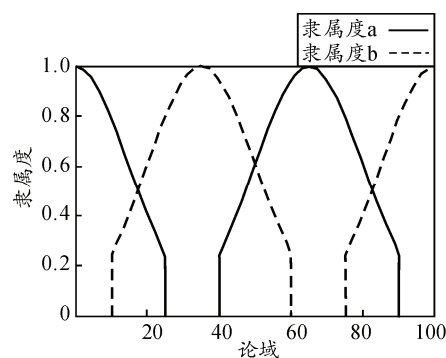
(a) 组织管理



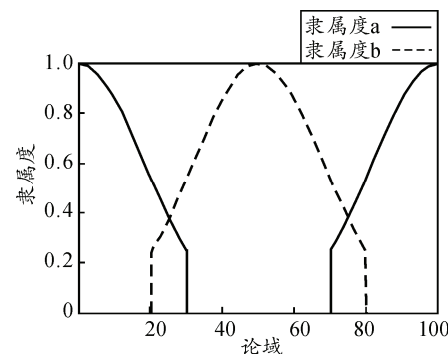
(b) 航天文化



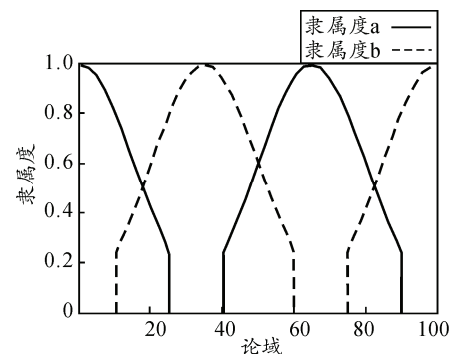
(c) 培训程度及经验水平



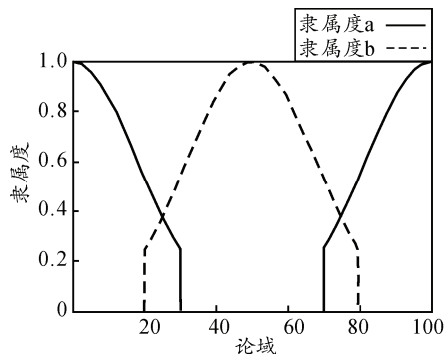
(d) 个人心理生理状态



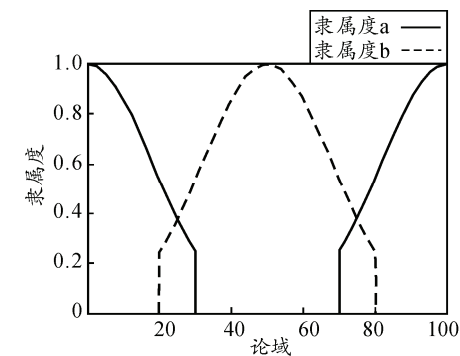
(e) 工作条件



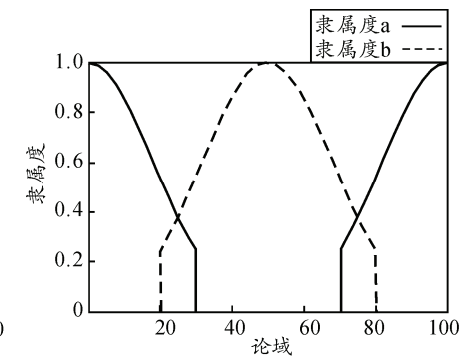
(f) 指挥协同能力



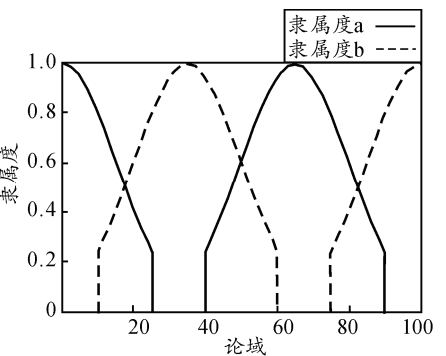
(g) 二岗人员监督能力



(h) 任务特性



(i) 指挥手段合理性



(j) 人机交互界面

图 2 模糊条件下的 CPC

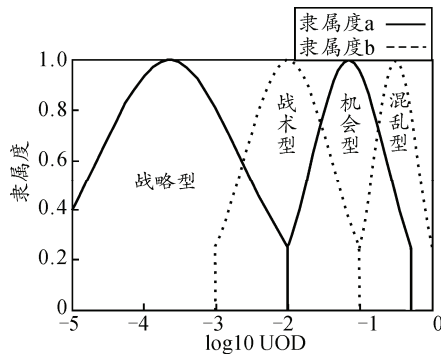


图 3 模糊条件下的控制模式

2.2 模糊规则的建立

CREAM 方法自身的逻辑是模糊规则建立的依据，模糊规则将 CPC 的模糊输入与控制模式的模糊集关联起来。笔者采用“IF-THEN”规则，该规则由 2 部分组成，前提条件为 10 类 CPC 的响应(模糊输入)，结果则与 4 类控制模式有关(模糊输出)。模糊规则建立在 10 类 CPC 评价等级的基础之上，将所有 CPC 可能的等级(3 级或 4 级)考虑在内，则有 $N_r = 3^6 \times 4^4 = 186\ 624$ 条规则，可表示为

IF x_1 is $\mu X_{1j}(x_1)$ and x_2 is $\mu X_{2j}(x_2)$...and x_{10} is $\mu X_{10j}(x_{10})$ Then z is $\mu Z_i(z)$

其中, j 代表第 j 条规则 ($j=1,2,\dots,186\ 624$); $\mu X_{kj}(x_k)$ 和 $\mu Z_i(z)$ 分别为 CPC 和控制模式的隶属度函数。

将其中的一个模糊规则举例如下：IF “组织管理”是“有效”，“航天文化”是“合适”，“培训程度及经验水平”是“足够且丰富”，“个人心理生理状态”是“良好”，“工作条件”是“不满意”，“指挥协同能力”是“优秀”，“二岗人员监督能力”是“有效”，“任务特性”是“正常水平”，“指挥手段合理性”是“合理”，“人机交互界面”是“可接受”，THEN “控制模式”为“战术型”，即概率区间为 $[1.0 \times 10^{-3}, 1.0 \times 10^{-1}]$ 。

虽然总的规则共有 186 624 条，但每次的输入变量并不会把它们全部激活；因此，在计算过程中可根据即时的输入量，只用被激活的控制规则进行近似推理，只需算出被激活的规则。

在模糊模型的应用阶段，规则中的 CPC 等级将用具体值来表示 $x_k^0 \in [0,100]$, $k=1,2,\dots,10$ ，所有值经过模糊化之后得到在模糊集中的单一值表示为 X'_k ，则有 $\mu_{X'_k}(x_k) = \delta(x_k, x_k^0)$ ，将“IF-THEN”规则用公式表示如下：

$$\mu X_{1j}(x_1) \wedge \mu X_{2j}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu X_{10j}(x_{10}) \wedge \mu Z(z)。$$

因此，根据上述内容，得出第 j 条规则公式为 $[\mu Z_i(z)]^{(j)} = \mu Z_j \wedge r_j。$ (5)

其中：

$$r_j = r_{1j} \wedge r_{2j} \wedge \dots \wedge r_{10j}；$$
 (6)

$$r_{kj} = \bigvee_{x_k} \mu X'_k(x_k) \wedge \mu X_{kj}(x_k) = \mu X_{kj}(x_k^0)。$$

因此最终结论

$$\mu Z_i(z) = \bigvee_{j=1}^{j=N_r} [\mu Z_i(z)]^{(j)}。$$
 (7)

2.3 去模糊化

重心法就是求出模糊集合隶属度函数曲线和横坐标包围区域面积的中心，选这个中心对应的横坐标值，作为这个模糊集合的代表值，相当于把该面积视为等厚平板时的重心；因此，笔者采用“重心法”去模糊化。

设论域 U 上的集合 A 的隶属度函数为 $\mu_A(x)$, $x \in U$ 。假设面积中心对应的横坐标为 x_{cen} ，则按照重心法的定义，可由下式算出：

$$x_{cen} = \frac{\int_U A(x) x dx}{\int_U A(x) dx}。$$

通过重心法去模糊化之后得到的值即为该环境下的人员失误概率(HEP_e)。

3 环境影响因子值的提出

CREAM 方法在过去多年的应用与实践当中，做出了许多的改进。文献[9]在 CREAM 方法原有的基础上引入了环境影响指数 β 。在 CREAM 的“CPC 与控制模式关系图”中画出一组用方程 $Y=X-\beta$ 表示的倾斜度为 45°的直线，表达式为 $\beta=X-Y=\sum_{降低} - \sum_{改进}$ ，即 β 表示了对绩效可靠性的期望效应为降低的 CPC 因子数对绩效可靠性的期望效应与改进的 CPC 因子数之差，并得出了任务环境与人因失效概率之间存在的函数关系，如下式：

$$HEP_e = HEP_0 \times 10^{k\beta}。$$

调整后的 10 类 CPC 对应的计算公式应为：

$$HEP_e = HEP_0 \times 10^{0.265\beta}。$$

经过计算可知，其中当 HEP₀ 为 0.002 24 时，

HEP_e 为情景环境中的人员失误概率，对应于控制模式中的某一点值。由于 β 的取值过于局限，4 类控制模式所代表的概率区间为 $[0.000\ 005, 1]$ ，而 β 则仅取 $[-10, 10]$ 中的 21 个整数，只能对应 21 个概率

值，不能代表所有的失误概率区间。采用环境影响指数 β 计算情景环境中的人因失误概率的方法取值显然过于宽泛，例如当 β 为 8 和 9 时，它们所对应失误概率之间的空缺值的区间为 (0.295 289 50, 0.543 560 66)，该区间内的概率值根本无法得出。

因此，笔者提出环境影响因子值 R 的概念，用 HEP_e 代表该情景环境下对应的控制模式中的某一概率。

$$R = 10^{0.265\beta} = \frac{HEP_e}{0.002\ 24}$$

在对任务动作进行分析时，用 HEP_i 表示该动作的人因失误概率

$$HEP_i = HEP_0 \times R。$$

HEP_0 通过分析任务所对应的认知功能得出。

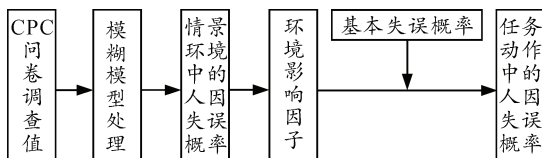


图 4 人员失误概率改进方法流程

人因失误概率改进方法的计算流程如图 4 所示。除基本失误概率的计算方法未做变动外，CPC 的处理和环境影响因子的计算均作了些许改动。前者意在结合航天发射场特点，后者则处理了方法本

身存在的问题。

4 实例分析

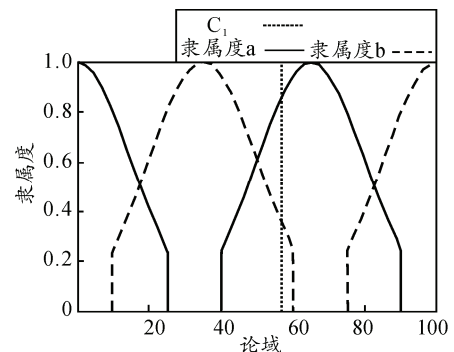
分析对象为我国某型导弹吊装任务，采用了专家咨询和问卷调查相结合的方式对 10 类 CPC 进行评价，最终得到的评价价值如表 3 所示。

表 3 吊装任务环境中的 CPC 评价

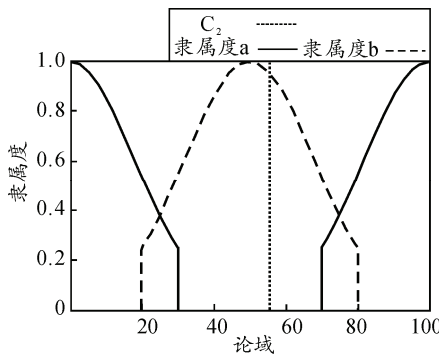
CPC 编号	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀
评估值	57	65	88	61	24	64	74	44	70	46

将该评价价值对应每类 CPC 的模糊集上表示，如图 5 所示。

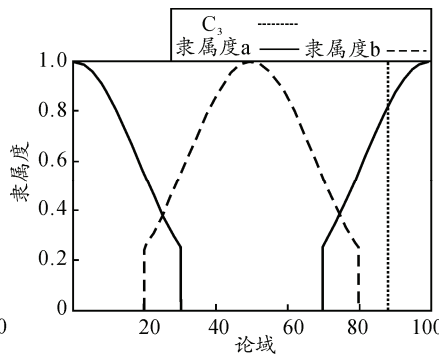
总的模糊规则共有 186 624 条，但该输入并不会将它们全部激活，在该实例中，被激活的模糊规则共有 16 条。根据模糊规则，映射到控制模式的模糊集中，如图 6，对应的隶属度为 (0,0.250 0,0,0)。



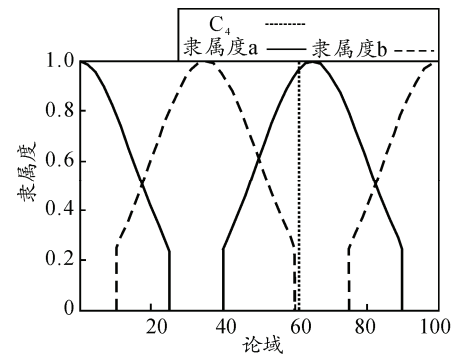
(a) 组织管理



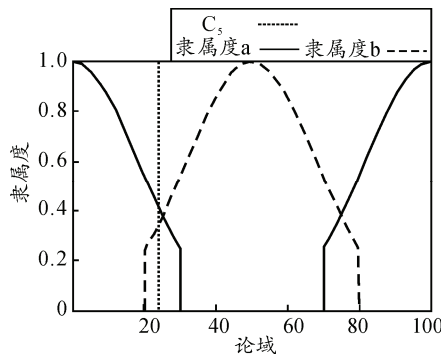
(b) 航天文化



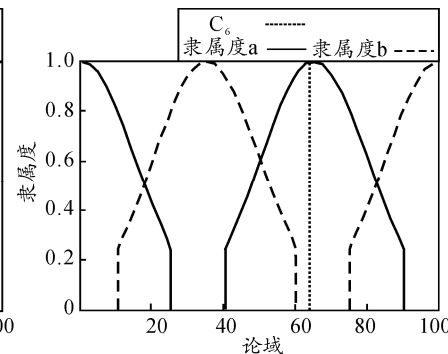
(c) 培训程度及经验水平



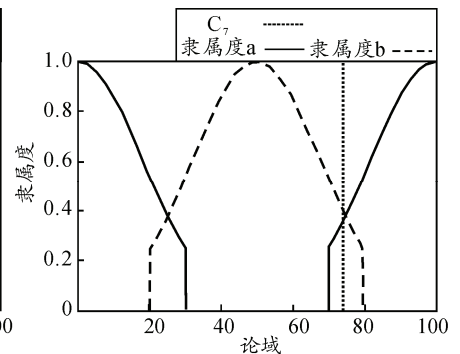
(d) 个人心理生理状态



(e) 工作条件



(f) 指挥协同能力



(g) 二岗人员监督能力

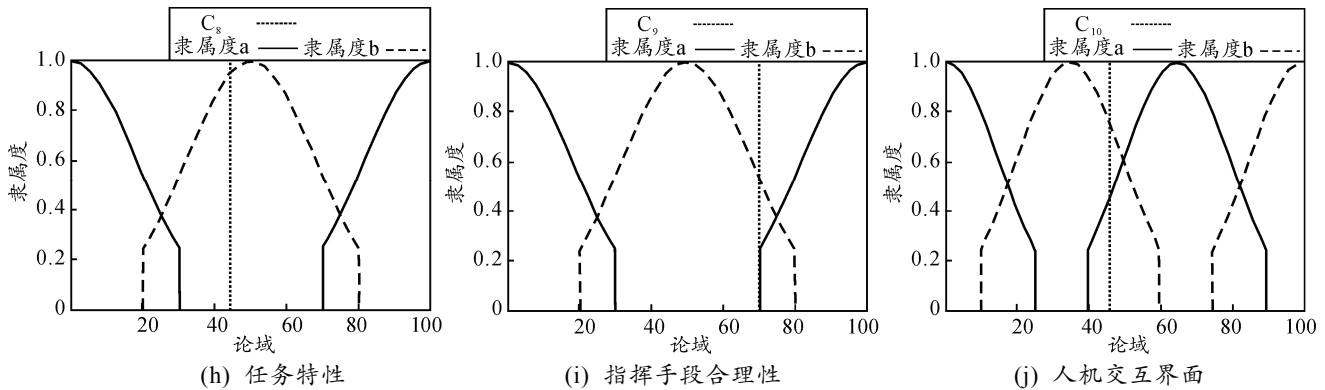


图 5 CPC 评价值得对应模糊集

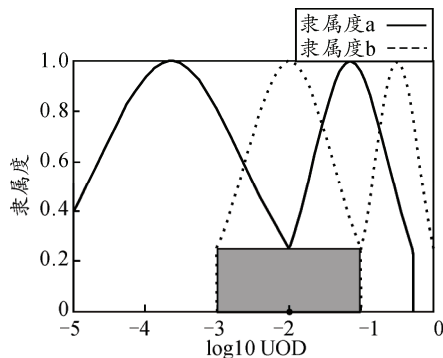


图 6 控制模式对应隶属度

图 6 中阴影部分代表隶属度所属范围，采用重

心法去模糊化得到重心值为实心点标注的位置，最终得出的情景环境下的人因失误概率为 0.01。根据

$$R = \frac{HEP_e}{0.002\ 24} = \frac{0.01}{0.002\ 24} = 4.464\ 2。$$

可知该环境下的情景环境影响因子为 4.464 2，由此推出计算任务动作人因失误概率的公式

$$HEP_t = HEP_0 \times 4.464\ 2。$$

下面以全弹吊装任务环节进行任务动作分析，选取起吊产品子任务，并进行任务分解，计算其失误概率，如表 4 所示。

表 4 起吊产品子任务人员失误概率

动作描述	认知活动	认知功能	失效模式	HEP ₀	HEP _t
起吊吊具至 4 根吊臂拉紧	调整	观察	错误辨识	0.007	0.031 250
检查吊具各连接部位	检验	观察	观察目标错误	0.001	0.004 464
将适配器下半部分放于指定位置	执行	执行	动作方式错误	0.003	0.013 392

该子任务下的动作之间为串联关系，且具有较低的相关性；因此，该子任务的人因失误概率应取 3 项动作中概率最大值，即 0.031 250。

5 结束语

根据航天发射场任务特点，笔者对 CREAM 中的共同绩效条件进行改进，由 9 类调整为 10 类 CPC；采用模糊方法处理了由 CPC 到控制模式之间的映射关系，实现了由 CPC 评价值得出情景环境下的人因失误概率的过程；提出了环境影响因子的概念 R，将控制模式与计算任务中人因失误概率联系起来，可进行航天发射场任务作业中的人因失误概率计算。综上所述，该 HRA 方法与我国航天发射场紧密结合，可为航天发射场人员安全分析提供理论基础和参考。

参考文献：

[1] 吴国兴. 航天事故中的人为失误分析[J]. 国际太空, 2005(2): 18-20.

[2] 王德汉, 黄伟芬. 载人航天中人的可靠性[J]. 航天医学与医学工程, 1996, 9(4): 295-301.
 [3] 何旭洪, 黄祥瑞. 工业系统中人的可靠性分析:原理方法与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 4-19.
 [4] Hollnagel E. Cognitive reliability and error analysis method(CREAM)[M]. Elsevier, 1998: 23-33.
 [5] 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.
 [6] 石辛民, 郝整清. 模糊控制及其 Matlab 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 29-40.
 [7] Konstandinidou M, Nivolianitou Z, Kiranoudis C, et al. A fuzzy modeling application of CREAM methodology for human reliability analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2006, 91(6): 706-716.
 [8] Yang Z L, Bonsall S, Wall A, et al. A modified CREAM to human reliability quantification in marine engineering[J]. Ocean Engineering, 2013, 58(4): 293-303.
 [9] He X, Wang Y, Shen Z, et al. A simplified CREAM prospective quantification process and its application[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2008, 93(2): 298-30.