

doi: 10.7690/bgzd.2016.11.019

基于 SRK 的航天测试发射操作人员认知行为分析

姜 曙¹, 马昕晖², 崔村燕², 段永胜¹, 吕潇磊¹

(1. 装备学院研究生管理大队, 北京 101416;

2. 装备学院航天装备系, 北京 101416)

摘要: 为提高航天发射的可靠性, 对基于 SRK 的航天测试发射操作人因可靠性中的关键环节进行分析。针对航天测试发射操作参与系统庞大、人员数量大等特点, 建立航天测试发射操作 SRK 认知模型, 在动态情景环境下对 SRK 模型中人员认知行为进行研究, 通过实例对航天测试发射操作中人员认知行为进行分析。分析结果表明: 该模型能够确定不同情境环境下人员操作认知行为方式, 可为人因可靠性定量分析提供参考。

关键词: 航天测试发射操作; 认知; 技能-规则-知识; 人因可靠性

中图分类号: TP206 **文献标志码:** A

Human Cognitive Behavior Analysis of Space Test and Launch Processing Based on SRK

Jiang Shu¹, Ma Xinhui², Cui Cunyan², Duan Yongsheng¹, LYU Xiaolei¹

(1. *Administrant Brigade of Postgraduate, Academy of Equipment, Beijing 101416, China;*

2. *Department of Space Equipment, Academy of Equipment, Beijing 101416, China*)

Abstract: In order to improve the reliability of the space launch, analyze the key link of human reliability of space test and launch processing based on SRK. Based on the characteristics of space test and launch processing which needs many systems and a large of people to participate in, establish SRK cognitive model of space test and launch processing, carry out research on SRK model human cognitive behavior under dynamic environment. Analyze human cognitive behavior in space test and launch processing by example. The analysis results show this model can define the cognitive behavior mode of human processing in different situational context, also can provide reference for quantitative analysis of human reliability.

Keywords: space test and launch processing; cognitive; skill-rule-knowledge (SRK); human reliability

0 引言

据统计, 国内外每年发生的伤亡事故中, 60% 以上与人的失误有关, 80% 以上的重大灾难事故为人因失误引起的^[1]。在核电厂中, 由人因失误引起的风险、事故占到了 90% 以上^[2]。在航天领域, 由于人误导致的事故比例也高达 90% 以上^[3]。随着我国航天事业的快速发展, 航天发射任务呈现出“新技术、高密度、并行化”等特点, 这对航天发射场提出了更高的要求。航天测试发射操作主要完成对火箭、卫星等产品的吊装、单元测试、分系统测试、火工品测试、系统匹配、总检查、推进剂加注以及点火发射等工作^[4], 是航天发射场重要的工作内容, 操作质量的好坏、测试结果的正确与否直接影响航天发射任务的成败。在整个测试发射操作过程中, 由于参与的设备复杂、人员数量和人员操作岗位多, 在此过程中难免出现人员失误对航天发射任务造成影响; 同时, 随着发射场设施设备可靠性水平的不

断提高, 人因失误在测试发射操作中的地位也进一步凸显, 有必要开展航天测试发射操作人因可靠性分析 (human reliability analysis, HRA) 研究。

一般来说, HRA 包括任务分析、认知行为模型建立、人因失误类型辨识、行为形成因子研究、人因失误概率预测及人因失误风险评估与控制^[5]。其中, 建立认知行为模型是 HRA 的关键环节, 是 HRA 的心理学基础部分, 也是人因失误的内在原因。研究人员认知行为, 有助于从理论上解释人因失误的产生与发展过程, 可为后续展开 HRA 提供理论支持; 因此, 建立人员认知行为模型对航天测试发射操作 HRA 尤为重要。笔者将围绕航天发射场测试发射操作展开 HRA 人员认知行为研究, 并建立适合航天发射场测试发射操作的人员认知模型。

1 航天测试发射操作特点

航天测试发射操作是整个航天任务的关键环节。与其他操作相比, 具有自身独有的特点。

收稿日期: 2016-07-01; 修回日期: 2016-08-07

作者简介: 姜 曙(1988—), 男, 河南人, 学士, 从事航天系统安全性与可靠性研究。

1.1 参与系统庞大，设备众多

航天发射任务是国家行为的大型工程实施过程，无论是探索性发射任务还是技术试验任务，是载人发射任务还是卫星发射任务，其涉及的测试发射操作分系统庞大，岗位众多。例如：载人发射任务测试操作中涉及到的系统包括：航天员系统、飞船应用系统、载人飞船系统、运载火箭系统、发射场系统、测控通信系统和着陆场系统等 7 大系统；而卫星发射任务测试操作中也包括：有效载荷系统、卫星系统、运载火箭系统、发射场系统和测控通信系统等 5 大分系统^[6]。同时，参与测试发射操作的每个分系统又由许多子系统和众多设备组成，一次发射任务涉及到的测试发射操作设备达万台左右。

1.2 人员数量大，工种多

在航天测试发射操作中，由于涉及到的系统复杂，设备众多，使参与操作的人员数量大、工种多，既有在发射场工作年限较长（一般在 10 a 以上），具有丰富经验的士官操作手，又有工作时间较短（一般在 2~5 a）、缺乏经验的测试人员，此类人员缺乏一定的经验，主要依靠各岗位的测试操作规程进行火箭、卫星的测试工作。虽然在发射场还有一批学历水平较高、专业知识丰富的行业专家，但他们往往不直接从事具体的测试操作，主要在测试发射任务中出现非常规情况或紧急状况时参与判断和决策。

1.3 设立“双岗”制操作岗位

基于航天任务高投入、高风险和社会影响大的工程属性，决定了在测试发射操作中对安全性和可靠性的特殊要求。测试发射操作的主体是人。为了提高测试人员发射操作的可靠性，最大限度降低人因失误，对每个测试发射操作岗位均设立一岗和二岗。其中：一岗主要负责测试发射具体操作，二岗负责具体的检查确认。即一岗每执行或执行完一个操作步骤，二岗都会进行技术检查和状态确认，一旦一岗在测试发射操作中出现人为差错（也即人因失误），二岗就会及时进行纠正，以此最大限度地减少人因失误发生的概率，提高人员操作可靠性。

2 航天测试发射操作 SRK 认知模型

技能、规则和知识 (skill rule knowledge, SRK) 模型由 Rasmussen 于 1986 年提出。该模型将人的认知行为分为技能型、规则型和知识型模式^[7]。

技能型认知模式是指人员面临非常熟悉的情景环境所采取的行为，此类人员一般具有丰富的工作

经验，在执行任务过程中，几乎可以做出近乎本能的认知反应，而不需用借助操作规程和经过大脑思考、加工。

规则型认知模式是指人员面临比较熟悉的情景环境所采取的行为，此类人员工作经验较为丰富，但在执行任务时，经常借助操作规程。

知识型认知模式是指人员面临不太熟悉的情景环境所采取的行为，此类人员一般经验较少，但自身存储知识量丰富。此类情景环境下，通常不存在可用的操作规程作为指导，面临情景环境时，操作者需要调取所学知识，进行诊断、决策和计划。

目前，SRK 认知模型已被研究人员广泛接受，并被引入到人因可靠性定量计算中。Hanaman 在人员认知可靠性 (human cognitive reliability, HCR) 方法中引入 SRK 认知模型，并得出了 3 种认知行为下的人因失误概率^[8]；Sun 等结合 SRK 认知模型，提出了一种工程化的人因失误概率量化方法^[9]；Saurin 利用 SRK 认知模型开发了一线工作人员的人因失误模式分类方法^[10]。

根据目前国内外相关文献资料，针对航天发射测试操作 HRA，还没有建立人员认知行为模型，这也对航天发射场开展 HRA 带来了障碍。笔者主要针对航天发射场测试发射操作，建立航天测试发射操作 SRK 认知模型，为开展航天发射场测试发射操作 HRA 奠定基础。

基于以上分析并结合 SRK 认知模型，可将士官操作手的操作行为作为技能型认知行为；将测试人员的测试行为作为规则型认知行为；将航天测试发射专家的判断和决策行为作为知识型认知行为。同时，针对航天测试发射操作特点，可建立航天测试发射操作 SRK 认知模型，如图 1 所示。

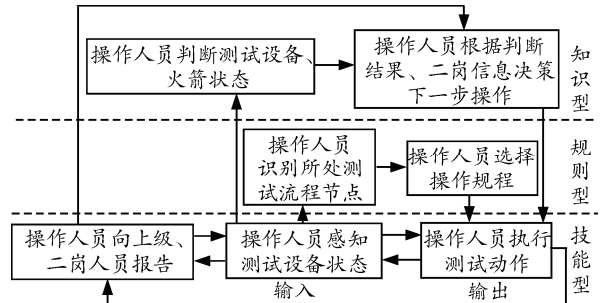


图 1 基于 SRK 模型的航天测试发射操作人员认知过程

3 航天测试发射操作认知行为模式确定

对某个具体的航天任务，其测试发射操作流程及测试设备和工具基本固定，但执行测试发射任务的人员由于受到生理、心理和周围环境的影响，其

认知行为状态也在时刻发生变化,即在 SRK 认知模型中,人员的认知行为既可能表现为“S”(技能型),也可能表现为“R”(规则型),又可能表现为“K”(知识型),人员的认知行为会在 3 种状态之间不断转换,故有必要通过一种方法确定人员在特定的情景环境下 3 种状态出现的概率。笔者将通过

建立 Hanaman 决策树确定航天测试发射操作 SRK 模型下认知行为模式。

3.1 Hanaman 决策树

Hanaman 决策树是由 Hanaman 在构建人员认知可靠性(human cognitive reliability, HCR)方法时,提出来的一种认知行为确定方法^[11],其结构如图 2。

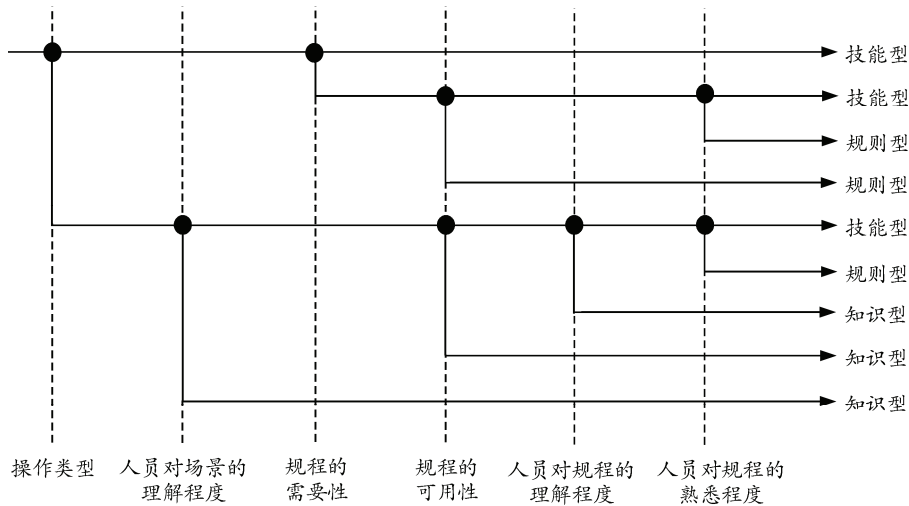


图 2 Hanaman 决策树

结合航天测试发射操作特点,表 1 给出了航天测试发射操作中 Hanaman 决策树中各分支的含义。

根据当前情景环境输入 6 个因素的状态,就可以得到人员所属的认知行为模式类型。

表 1 航天测试发射操作 Hanaman 决策树中各分支含义

分支	测试发射操作类型	人员对操作岗位理解程度	规程需要性	规程可用性	人员对规程理解程度	人员对规程熟悉程度
下支	非常规	不理解	需要	不可用	不理解	不熟悉
上支	常规	理解	不需要	可用	理解	熟悉

3.2 动态情景环境下认知行为模式的确定

1) 动态情景环境下 6 种因素状态的确定。

对于不同的情景环境, Hanaman 决策树中 6 种因素的状态也不同,即既有“下支”,又有“上支”。首先要确定 6 种因素所属分支,同时确定了分支的类型(上支或下支),还需考虑每个分支对应项目的轻重程度。由于目前国内航天领域人因可靠性分析还处于研究初步阶段,在发射场人因数据相对较为匮乏的情况下,可以通过专家概率评价的方式来获取所需人因数据。具体步骤如下:

第 1 步,选择航天领域专家若干名(一般为了使概率评价效果更好,至少选择 5 名专家^[12]),这些专家可以是航天发射场的测试发射操作人员,也可以是管理、决策人员。每个专家根据自身的知识和经验,给出表 1 中 6 种因素 2 个分支的概率,其基本形式为:

行为模式决定因素概率(上支,下支)=(P_1, P_2),

其中 $P_1 + P_2 = 1$;

第 2 步,考虑到专家在知识、经验上的差异,可以为每个专家设置权重 $q_i (i=1, 2, \dots, m)$, 相应定义权重列向量:

$$Q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_m]^T, \text{ 其中 } m \text{ 为专家人数,}$$

并且有 $\sum_{i=1}^m q_i = 1$ 。

第 3 步,专家 i 对因素 j 的概率评价为:

$$P_{ji} = (P^1, P^2)_{ji} = (P_{ji}^1, P_{ji}^2)。$$

其中 $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n, n$ 为 Hanaman 决策树中因素个数(这里 n 为 6), 则有决定因素 j 的概率行向量:

$$P_j^1 = [P_{j1}^1 \ P_{j2}^1 \ \dots \ P_{jm}^1];$$

$$P_j^2 = [P_{j1}^2 \ P_{j2}^2 \ \dots \ P_{jm}^2]。$$

第 4 步，最后通过加权平均求得行为模式因素 j 的最终状态：

$$P_j = (P^1, P^2)_j = (P_j^1 \cdot Q, P_j^2 \cdot Q) = \left(\sum_{i=1}^m P_{ji}^1 \cdot q_i, \sum_{i=1}^m P_{ji}^2 \cdot q_i \right) \quad (1)$$

2) SRK 认知模型中行为模式的确定。

将各行为模式因素的最终状态自左到右代入 Hanaman 决策树中，就可得到人员所属的行为模式类型。Hanaman 决策树 9 个输出的概率分别为：

$$\left. \begin{aligned} P_a &= P_1^2 \cdot P_3^2 \\ P_b &= P_1^2 \cdot P_3^1 \cdot P_4^2 \cdot P_6^2 \\ P_c &= P_1^2 \cdot P_3^1 \cdot P_4^2 \cdot P_6^1 \\ P_d &= P_1^2 \cdot P_3^1 \cdot P_4^1 \\ P_e &= P_1^1 \cdot P_2^2 \cdot P_4^2 \cdot P_5^2 \cdot P_6^2 \\ P_f &= P_1^1 \cdot P_2^2 \cdot P_4^2 \cdot P_5^2 \cdot P_6^1 \\ P_g &= P_1^1 \cdot P_2^2 \cdot P_4^2 \cdot P_5^1 \\ P_h &= P_1^1 \cdot P_2^2 \cdot P_4^1 \\ P_i &= P_1^1 \cdot P_2^1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

进而得到 3 种行为模式的概率，分别为：

$$\left. \begin{aligned} P_{skill} &= P_a + P_b + P_c \\ P_{rule} &= P_c + P_d + P_f \\ P_{knowledge} &= P_g + P_h + P_i \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

也就是当前动态情景环境中人员的行为模式概率(技能型，规则型，知识型) $= (P_{skill}, P_{rule}, P_{knowledge})$ ，并且 $P_{skill} + P_{rule} + P_{knowledge} = 1$ ，验证了在动态情景环境下，人员以一定的概率在 3 种行为模式之间转换。

4 实例分析

据相关资料统计，控制系统中由于人因失误导致的故障数占有所有故障数的 60%左右。笔者选取航天测试发射中人因失误较多的控制系统发控台岗位操作为实例分析对象。

4.1 动态情景环境描述

控制系统发控台岗位人员主要完成对发控台面板开关、按钮以及计算机的状态准备与复查，根据口令要求启动地面电源主、副机，检查漏电情况等任务，该岗位配备一岗、二岗人员，共同完成测试发射操作与状态检查。

根据我国某航天发射基地历次发射任务统计，笔者选择以下 3 种控制系统发控台典型情景环境，进行认知行为模式判断与确定。

情景环境 1：操作手经过严格的岗位培训，操作熟练，经验丰富，严谨细致；测试项目简单、时间较短；组织周密、责任明确；二岗技术水平高、监督有力。

情景环境 2：操作手经过一定训练，具有一定操作经验；测试项目较复杂、历时较长；操作规程完备，二岗技术水平一般，但有时不能及时协助操作手，甚至会误导操作手。

情景环境 3：在测试中出现故障，在排故中有非常规的操作，而没有现成的操作规程；或者出现紧急情况需要进行应急处置，而操作手对这种情景较为陌生。

4.2 专家概率评价

选择如表 2 所示的 5 位专家对航天测试发射人员的认知行为模式影响因素进行评价。

表 2 专家情况简介

序号	姓名	简介
1	专家 1	多型号航天发射任务控制系统指挥、测发管理
2	专家 2	多型号航天发射任务控制系统指挥
3	专家 3	多型号航天发射任务控制系统指挥
4	专家 4	多型号航天发射任务控制系统发控台操作手、地面抓总
5	专家 5	多型号航天发射任务控制系统发控台操作手、地面抓总

建立如表 3 所示的动态情景环境下控制系统发控台人员认知行为模式影响因素评价表。

表 3 动态情景环境下控制系统发控台人员认知行为模式影响因素评价

决定因素	评价概率 (P_1, P_2)
测试发射操作类型 (非常规, 常规)	(,)
人员对操作岗位理解程度 (不理解, 理解)	(,)
规程需要性 (需要, 不需要)	(,)
规程可用性 (不可用, 可用)	(,)
人员对规程理解程度 (不理解, 理解)	(,)
人员对规程熟悉程度 (不熟悉, 熟悉)	(,)

给选取的 5 名专家发放表 3，分别对 3 种情景环境进行概率评价，得到如表 4~表 6 的认知行为模式影响因素评价结果表。

表 4 动态情景环境 1 下控制系统发控台人员认知行为模式影响因素评价结果

行为模式决定因素	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
测试发射操作类型 (非常规, 常规)	(0.10, 0.90)	(0.02, 0.98)	(0.10, 0.90)	(0.30, 0.70)	(0.18, 0.82)
人员对操作岗位理解程度 (不理解, 理解)	(0.10, 0.90)	(0.05, 0.95)	(0.10, 0.90)	(0.20, 0.80)	(0.18, 0.82)
规程的需要性 (需要, 不需要)	(0.90, 0.10)	(0.10, 0.90)	(0.30, 0.70)	(0.60, 0.40)	(0.64, 0.36)
规程可用性 (不可用, 可用)	(0.10, 0.90)	(0.02, 0.98)	(0.00, 1.00)	(0.30, 0.70)	(0.28, 0.72)
人员对规程理解程度 (不理解, 理解)	(0.10, 0.90)	(0.02, 0.98)	(0.10, 0.90)	(0.10, 0.90)	(0.32, 0.68)
人员对规程熟悉程度 (不熟悉, 熟悉)	(0.10, 0.90)	(0.01, 0.99)	(0.10, 0.90)	(0.10, 0.90)	(0.17, 0.83)

表 5 动态情景环境 2 下控制系统发控台人员认知行为模式影响因素评价结果

行为模式决定因素	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
测试发射操作类型 (非常规, 常规)	(0.10, 0.90)	(0.10, 0.90)	(0.40, 0.60)	(0.10, 0.90)	(0.20, 0.80)
人员对操作岗位理解程度 (不理解, 理解)	(0.60, 0.40)	(0.35, 0.65)	(0.30, 0.70)	(0.40, 0.60)	(0.48, 0.52)
规程需要性 (需要, 不需要)	(0.90, 0.10)	(0.90, 0.10)	(0.90, 0.10)	(0.90, 0.10)	(0.86, 0.14)
规程可用性 (不可用, 可用)	(0.10, 0.90)	(0.10, 0.90)	(0.00, 1.00)	(0.20, 0.80)	(0.11, 0.89)
人员对规程理解程度 (不理解, 理解)	(0.30, 0.70)	(0.10, 0.90)	(0.20, 0.80)	(0.40, 0.60)	(0.72, 0.28)
人员对规程熟悉程度 (不熟悉, 熟悉)	(0.70, 0.30)	(0.65, 0.35)	(0.55, 0.45)	(0.50, 0.50)	(0.88, 0.12)

表 6 动态情景环境 3 下控制系统发控台人员认知行为模式影响因素评价结果

行为模式决定因素	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
测试发射操作类型 (非常规, 常规)	(0.80, 0.20)	(0.70, 0.30)	(0.65, 0.35)	(0.60, 0.40)	(0.55, 0.45)
人员对操作岗位理解程度 (不理解, 理解)	(0.65, 0.35)	(0.90, 0.10)	(0.85, 0.15)	(0.60, 0.40)	(0.75, 0.25)
规程需要性 (需要, 不需要)	(0.60, 0.40)	(0.80, 0.20)	(0.10, 0.90)	(0.70, 0.30)	(0.92, 0.08)
规程可用性 (不可用, 可用)	(0.40, 0.60)	(0.30, 0.70)	(0.50, 0.50)	(0.60, 0.40)	(0.45, 0.55)
人员对规程理解程度 (不理解, 理解)	(0.35, 0.65)	(0.20, 0.80)	(0.30, 0.70)	(0.55, 0.45)	(0.84, 0.16)
人员对规程熟悉程度 (不熟悉, 熟悉)	(0.30, 0.70)	(0.20, 0.80)	(0.30, 0.70)	(0.55, 0.45)	(0.75, 0.25)

根据专家的知识 and 经验水平, 采用成对比较法^[13]得出 5 位专家的权重向量为 $Q = [0.3, 0.2, 0.2, 0.15, 0.15]^T$, 将表 4 的数据代入式(1)可得在动态情景环境 1 下, 控制系统发控台 6 种人员认知行为模式影响因素评价结果, 如表 7。

表 7 动态情景环境 1 下控制系统发控台人员行为模式影响因素最终状态

行为模式影响因素	最终状态
测试发射操作类型(非常规, 常规)	(0.126 0, 0.874 0)
人员对操作岗位理解程度(不理解, 理解)	(0.117 0, 0.883 0)
规程需要性(需要, 不需要)	(0.536 0, 0.464 0)
规程可用性(不可用, 可用)	(0.121 0, 0.879 0)
人员对规程理解程度(不理解, 理解)	(0.117 0, 0.883 0)
人员对规程熟悉程度(不熟悉, 熟悉)	(0.092 5, 0.907 5)

将表 7 中数据代入式(2)和式(3)中, 可得情景环

境 1 下, 技能型、规则型和知识型认知功能的评价概率向量为(0.857 6, 0.102 8, 0.039 6)。即在此情景环境下, 人员处于技能型认知模式的概率为 85.76%; 人员处于规则型认知模式的概率为 10.28%; 人员处于知识型认知模式的概率为 3.96%, 可见情景环境 1 下人员处于技能型认知模式的概率最大。

运用同样的方法, 可得到在情景环境 2 和情景环境 3 下技能型、规则型和知识型认知功能的评价概率向量分别为(0.336 7, 0.548 5, 0.114 8)和(0.227 2, 0.147 1, 0.625 7), 如表 8 所示。通过图 3 可以看出: 在动态情景环境 1 下, 人员认知行为表现为技能型模式的概率最大; 在动态情景环境 2 下, 人员认知行为表现为规则型模式的概率最大; 在动

态情景环境 3 下，人员认知行为表现为知识型模式的概率最大，这也与航天测试发射操作实际情况相符。这样，可得到航天测试发射操作任意动态情景环境下人员认知模型，为后续开展人因失误识别、人因失误概率预测和人因失误风险评估与控制奠定基础。

表 8 3 种动态情景环境下的认知行为模式概率分布

动态情景环境	行为模式概率		
	技能型	规则型	知识型
1	0.857 6	0.102 8	0.039 6
2	0.336 7	0.548 5	0.114 8
3	0.227 2	0.147 1	0.625 7

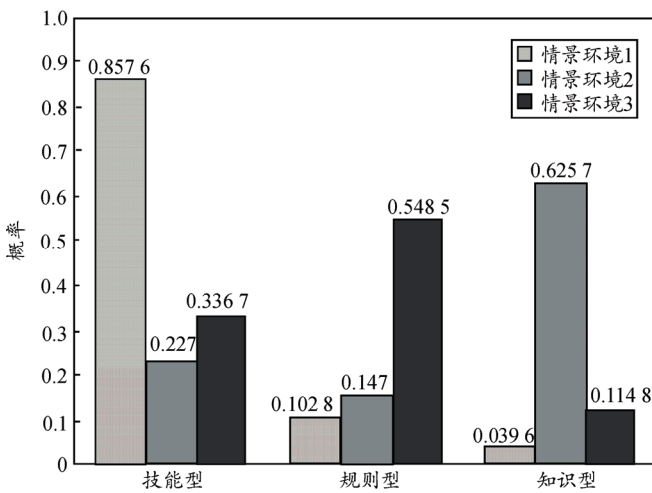


图 3 3 种动态情景环境下的认知行为模式概率分布柱状图

5 结束语

笔者围绕航天测试发射操作，总结航天测试发射操作特点，建立适合航天测试发射操作的 SRK 认知模型，以航天测试操作控制系统发控台为实例进行验证。验证结果表明：该模型能够确定不同情境环境下人员操作认知行为方式，可为后续开展航天测试发射操作 HRA 奠定基础。

目前在航天领域，人因数据获取困难一直是人因可靠性分析要解决的关键问题，随着航天发射场现场人因数据的挖掘和历史人因数据的不断积累，航天测试发射操作人员认知行为确定过程中所用的数据将具有更强的客观性，SRK 模型计算出的认知

行为模式将会更加准确，航天测试发射操作的人因可靠性分析结果将会更加合理，这将能为提高航天系统的安全性及可靠性提供有力的技术、决策支持。

参考文献:

- [1] Hollnagel E. The phenotype of erroneous actions[J]. International Journal of Man-machine Studies, 1993, 39(1): 1-32.
- [2] French S, Bedford T, Pollard S J T, et al. Human reliability analysis: A critique and review for managers[J]. Safety Science, 2011, 49(6): 753-763.
- [3] 王黎静, 王彦龙. 人的可靠性分析—人因差错风险评估与控制[M]. 北京: 航空工业出版社, 2015: 2.
- [4] 张育林. 航天发射项目管理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 70-82.
- [5] 蒋英杰. 认知模型支持下的人因可靠性分析方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2012: 6-17.
- [6] 徐克俊. 航天发射质量控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 6-10.
- [7] Rasmussen J. Skills, rules, and knowledge; Signals, signs and symbols, and other distinctions in human performance models[J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, 1983, 13(3): 257-266.
- [8] Hanaman G W, Spurgin A J, Lukic Y. Human cognitive reliability model for PRA analysis(NUS-4531)[R]. Electric Power Research Institute, Palo Alto, 1984.
- [9] Sun Z Q, Xie H W, Shi X J, et al. Engineering approach for human error probability quantification[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2009, 20(5): 1144-1152.
- [10] Saurin T A, Guimaraes L B M, Costella M F, et al. An algorithm for classifying error types of front-line workers based on the SRK framework[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2008, 38(11): 1067-1077.
- [11] Hanaman G W, Spurgin A J, Lukic Y. Human cognitive reliability model for PRA analysis(NUS-4531)[R]. Rev. 3, NUS corporation, prepared for Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1984.
- [12] Embrey D E. SLIM-MAUD: An approach to assessing human error probabilities using structured expert judgment (NUREG/CR-3518)[R]. U.S Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, 1983.
- [13] 付超, 侯震. 基于多等级方案成对比较的决策方法[J]. 控制与决策, 2015, 30(10): 1828-1834.