

doi: 10.7690/bgzdh.2024.03.017

基于模糊逻辑的人为差错概率量化方法

蒋英杰, 胡春宇, 梁永治

(中国人民解放军 96753 部队, 济南 271100)

摘要: 为满足人机系统概率风险评估的需要, 提出一种人为差错概率量化方法。分析技能、规则和知识为基础 (skill, rule and knowledge-based, SRK) 框架和行为模式的确定方法 Hanaman 决策树法, 指出在确定行为模式的过程中考虑行为模式影响因素的不确定性是必要的; 使用模糊逻辑方法处理行为模式各个影响因素的不确定性, 根据 Hanaman 决策树构建模糊推理规则, 利用系统人为行为可靠性程序 (systematic human action reliability procedure, SHARP) 方法所提供的人为差错概率区间确定人为差错概率的隶属度函数。结果表明: 该方法考虑了任务场景的不确定性, 可以得到人为差错概率的精确值, 满足人机系统概率风险评估的需要。

关键词: 人为差错概率; 模糊逻辑方法; 行为模式; 人因可靠性分析

中图分类号: TP301 **文献标志码:** A

Quantification Method of Human Error Probability Based on Fuzzy Logic

Jiang Yingjie, Hu Chunyu, Liang Yongzhi

(No. 96753 Unit of PLA, Ji'nan 271100, China)

Abstract: In order to meet the needs of probabilistic risk assessment of man-machine system, a quantitative method of human error probability is proposed. Skill, rule and knowledge-based (SRK) framework and Hanaman decision tree method for behavior pattern determination are analyzed. It is pointed out that it is necessary to consider the uncertainty of the influencing factors of behavior pattern in the process of behavior pattern determination; The fuzzy logic method is used to deal with the uncertainty of each influencing factor of the behavior pattern, and the fuzzy reasoning rules are constructed according to the Hanaman decision tree. The membership function of human error probability is determined by using the human error probability interval provided by systematic human action reliability procedure (SHARP) method. The results show that the uncertainty of the task scenario is considered in the method, and the accurate value of the human error probability can be obtained, which meets the needs of the probabilistic risk assessment of the man-machine system.

Keywords: human error probability; fuzzy logic method; behavior pattern; human reliability analysis

0 引言

在人因可靠性分析中, 人为差错概率的量化是一项非常重要的研究内容。一方面, 人机系统的概率风险评估要求分析人员必须提供人为差错的概率值^[1-2]; 另一方面, 人为差错概率是对各种人为差错进行筛选分析的基础, 可以为人为差错规避措施的制定提供重要的依据^[3-4]。因此, 对人为差错概率量化进行研究具有非常重要的意义。

经过多年的努力, 人因可靠性研究人员已经开发了许多人为差错概率量化方法, 其中一些已经应用于工程实践中, 得到了一定程度的认可^[5-6]。从文献查阅来看, 人因可靠性分析的研究人员在人为差错概率量化方面已经达成了一些共识: 1) 人为差错概率量化方法应该包含对人认知行为的解释, 从而具有坚实的理论基础^[7]; 2) 人为差错概率量化方法应该考虑任务场景的不确定性, 从而能够体现任务

场景尤其是动态任务场景的真实性^[8]; 3) 人为差错概率量化方法应该提供人为差错概率的精确值, 从而满足人机系统概率风险评估的需要^[9]。基于上述分析, 笔者构建一种新的人为差错概率量化方法。该方法使用技能、规则和知识为基础 (SRK) 框架来描述人的认知行为, 通过模糊逻辑方法来处理任务场景的不确定性, 并可以得到人为差错概率的精确值。

1 行为模式的概念与确定方法

1.1 行为模式的基本概念

Rasmussen 教授^[10]通过分析总结人类认知行为的特点于 1983 年提出了行为模式的概念, 用于对各种各样的行为过程进行规范化描述和分类。他将人的行为分为技能型、规则型和知识型 3 种基本行为模式, 即 SRK 框架。

收稿日期: 2023-11-21; 修回日期: 2023-12-25

第一作者: 蒋英杰 (1981—), 男, 山东人, 博士。

技能型行为模式是指当操作人员面对非常熟悉的任务场景时所采取的一种近似于本能反应的行为模式，即操作人员在应激后立即做出反应。在该模式中，由于操作人员对任务非常熟练，基本可以认为无需任何思考。规则型行为模式是指操作人员面对比较熟悉的任务场景时所采取的一种行为模式。在该模式中，操作人员受到应激后首先进行信息处理，选取所需要的规程，然后按照规程要求来执行任务。知识型行为模式是指操作人员面对从未出现过的任务场景时，所采取的一种行为模式。在这种行为模式中，通常不存在可用的操作规程作为指导，操作人员需要依赖自身的知识经验对应激信息进行分析、诊断并做出相应的任务计划。

从上述定义可以看出，SRK 框架体现了人认知行为的基本特点和差异性，具有较强的理论合理性。目前，这一框架已经在人因可靠性分析中得到了广泛应用。Hanaman 等^[11]将 SRK 框架应用于人为差

错概率的量化，提出了人的认知可靠性 (human cognitive reliability, HCR) 方法；Reason^[12]使用 SRK 框架分析了人为差错的类型，将人为差错分为技能型疏忽、技能型过失、规则型错误和知识型错误；另外，文献[13]基于 SRK 框架分析了一线工作人员可能发生的人为差错类型。总的来说，SRK 框架对人的认知行为进行了合理的描述，可以作为人为差错概率量化方法的理论基础。

1.2 行为模式的确定

Hanaman 等^[11]在构建 HCR 方法时提出了基于决策树的行为模式确定方法。该方法认为行为模式是由操作类型、人员对场景的理解程度、规程的需要性、规程的可用性、人员对规程的理解程度以及人员对规程的熟悉程度 6 个因素决定的。上述因素与行为模式之间的关系如图 1 所示。表 1 给出了 Hanaman 决策树中各分枝的含义。

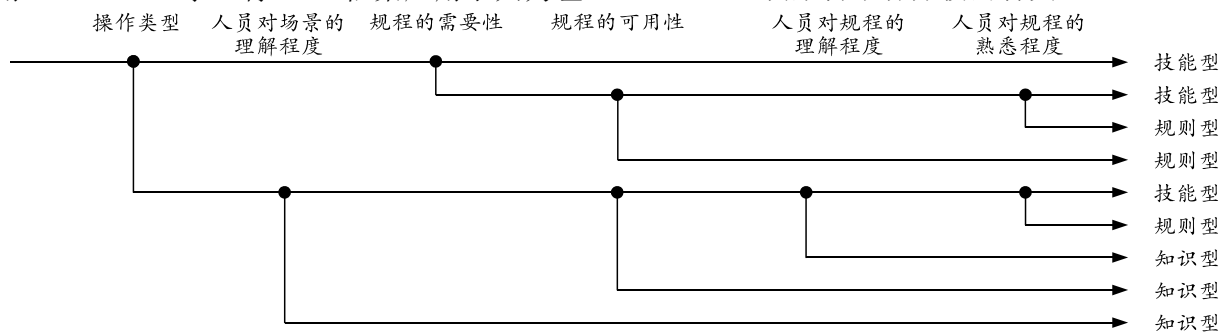


图 1 行为模式的 Hanaman 决策树确定方法

表 1 Hanaman 决策树中各分枝的含义

分枝	操作类型	人员对场景的理解程度	规程的需要性	规程的可用性	人员对规程的理解程度	人员对规程的熟悉程度
上枝	常规操作	理解	不需要	可用	理解	熟悉
下枝	非常规操作	不理解	需要	不可用	不理解	不熟悉

从图 1 可以看出，该方法在使用上十分简便，只要输入 6 个因素的状态，就很容易得到最终的行为模式类型。但需指出的是，该方法将影响行为模式的每个因素的影响效果都分为 2 种，以此作为分支构建决策树。这种处理方式是比较粗糙的：一方面分析人员对影响因素的判断具有主观性，他们给出的评价结果更多的是模糊性表述，而非确定性结论；另一方面任务场景并非静止不动的，通常认为其变动性主要有工作环境，系统状态以及人自身的能力、精神状态 3 个来源^[14]。这 2 方面的原因共同导致了行为模式影响因素的评价结果存在很大的不确定性。由于这种不确定性在真实任务场景中是普遍存在的；因此，在确定行为模式的过程中充分考虑这种不确定性是必要的。

不同行为模式下人的行为特点是不同的，其人为差错概率也存在一定的差别。SHARP 方法给出了各种行为模式下人为差错概率的区间，如表 2 所示^[15]。该方法认为，人为差错概率应该在 $5 \times 10^{-5} \sim 0.5$ 之间。目前，这一估计值在人因可靠性分析中具有较高的认可程度，已经被许多人因可靠性分析人员所借鉴^[16]。考虑到人机系统的概率风险评估要求提供人为差错概率的精确值；因此，SHARP 方法所提供的人为差错概率区间并不能满足要求。

表 2 行为模式与人为差错概率区间

行为模式	人为差错概率区间
技能型	$[5 \times 10^{-5}, 5 \times 10^{-3}]$
规则型	$[5 \times 10^{-4}, 5 \times 10^{-2}]$
知识型	$[5 \times 10^{-3}, 0.5]$

2 基于模糊逻辑的人为差错概率量化方法

通过上述分析可以看出, Hanaman 决策树方法确定行为模式, 具有结构清晰、使用简便的优点。但由于没有考虑行为模式影响因素的不确定性, 方法的适用性受到一定的限制。因此, 通过一定的方式对行为模式影响因素的不确定性进行处理是必要的。

模糊逻辑方法是一种处理不确定性问题的有效方法, 其处理过程并不复杂, 已有现成的工具可供使用, 如 Matlab 模糊逻辑工具箱。目前, 模糊逻辑方法已经广泛应用于自动控制、模式识别等多个领域。另外, 模糊逻辑方法在人因可靠性分析中也有许多应用。文献[9]使用模糊逻辑方法对认知可靠性与误差分析方法 (cognitive reliability and error analysis method, CREAM) 认知控制模式进行处理, 最终得到了人为差错概率的精确值。文献[17]将模糊逻辑方法应用于确定人员动作之间的相关性, 改进了人为错误率预测技术 (technique for human error rate prediction, THERP) 方法所存在的缺陷。

文献[18]在人为差错事件的风险评估中引入模糊逻辑方法, 提高了风险评估的科学性。鉴于模糊逻辑方法具有完整的理论体系并得到工程技术人员的广泛认可, 笔者使用模糊逻辑方法来处理行为模式影响因素的不确定性。

由于 SHARP 方法所提供的人为差错概率区间与行为模式影响因素密切相关, 而人为差错概率量化方法最终需要得到的是人为差错概率的精确值; 因此, 将行为模式影响因素作为模糊逻辑系统的输入, 将人为差错概率作为模糊逻辑系统的输出, 通过模糊推理即可得到人为差错概率的精确值。新方法由行为模式影响因素的模糊化、模糊推理以及人为差错概率的精确化 3 部分组成。

2.1 行为模式影响因素的模糊化

从图 1 可知, 行为模式的影响因素有 6 个, 而 Hanaman 决策树方法将每个影响因素的评价结果都分为 2 种, 采用的是二叉树结构。因此, 将 6 个影响因素的模糊集合定义为如表 3 所示的形式。

表 3 行为影响因素的模糊集合定义

模糊集合	操作类型	人员对场景的理解程度	规程的需要性	规程的可用性	人员对规程的理解程度	人员对规程的熟悉程度
集合 1	常规操作	理解	不需要	可用	理解	熟悉
集合 2	非常规操作	不理解	需要	不可用	不理解	不熟悉

另外, 将影响因素的评分范围都设定为[0, 10]。同时规定, 数值越大, 结果越倾向于集合 1; 数值越小, 结果越倾向于集合 2。基于这一规定, 采用三角函数作为行为模式影响因素的隶属度函数。图 2 为操作类型的隶属度函数, 其他因素的隶属度函数与此类似。

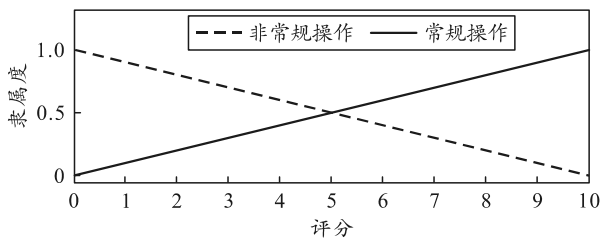


图 2 行为模式影响因素“操作类型”的隶属度函数

需要说明的是, 行为模式影响因素的评分是由分析人员或专家给出的。为保证评分的准确性, 可以使用多个分析人员或专家进行多次评分, 然后将所有结果进行综合, 从而得到最终的评分。

2.2 模糊推理

为进行模糊推理, 首先要定义输出变量的模糊集合。由于所要得到的是行为模式, 因此按照 SRK

框架, 将行为模式的模糊集合定义为: 行为模式集合={技能性行为模式, 规则型行为模式, 知识型行为模式}。

模糊推理的核心在于模糊规则的构建。考虑到 Hanaman 决策树方法是基于专家的知识 and 经验建立的, 在结构上具有较强的理论合理性; 因此, 模糊规则只需要按照 Hanaman 决策树确定行为模式的基本思想构建即可。由图 1 可知决策树最后一共产生了 9 个输出, 因此定义 9 条模糊规则:

规则 1: IF (操作类型为常规操作) and (规程的需要性为不需要), THEN (行为模式为技能型);

规则 2: IF (操作类型为常规操作) and (规程的需要性为需要) and (规程的可用性为可用) and (人员对规程的熟悉程度为熟悉), THEN (行为模式为技能型);

规则 3: IF (操作类型为常规操作) and (规程的需要性为需要) and (规程的可用性为可用) and (人员对规程的熟悉程度为不熟悉), THEN (行为模式为规则型);

规则 4: IF (操作类型为常规操作) and (规程的

需要性为需要)and(规程的可用性为不可用), THEN(行为模式为规则型);

规则 5: IF(操作类型为非常规操作)and(人员对场景的理解程度为理解)and(规程的可用性为可用)and(人员对规程的理解程度为理解)and(人员对规程的熟悉程度为熟悉), THEN(行为模式为技能型);

规则 6: IF(操作类型为非常规操作)and(人员对场景的理解程度为理解)and(规程的可用性为可用)and(人员对规程的理解程度为理解)and(人员对规程的熟悉程度为不熟悉), THEN(行为模式为规则型);

规则 7: IF(操作类型为非常规操作)and(人员对场景的理解程度为理解)and(规程的可用性为可用)and(人员对规程的理解程度为不理解), THEN(行为模式为知识型);

规则 8: IF(操作类型为非常规操作)and(人员对场景的理解程度为理解)and(规程的可用性为不可用), THEN(行为模式为知识型);

规则 9: IF(操作类型为非常规操作)and(人员对场景的理解程度为不理解), THEN(行为模式为知识型)。

2.3 人为差错概率的精确化

通过模糊推理得到的是行为模式的模糊集合, 还需要确定输出变量人为差错概率的隶属度函数, 然后再使用一定的反模糊化方法, 才能得到人为差错概率的精确值。

为确定人为差错概率的隶属度函数, 对 SHARP 所提供的每种行为模式下的人为差错概率区间做如下变换: 将人为差错概率除以 5, 然后取以 10 为底的对数。如此一来, 变换后的人为差错概率区间如表 4 所示。

表 4 变换后的人为差错概率区间

行为模式	人为差错概率区间
技能型	[-5, -3]
规则型	[-4, -2]
知识型	[-3, -1]

选择高斯函数作为变换后人为差错概率的隶属度函数类型。考虑到人因可靠性分析中普遍将人为差错概率分布函数的 0.95 和 0.05 分位点作为人为差错概率区间的上下限^[19-20]; 因此, 可将表 4 中概率区间的上下限视为变换后人为差错概率在 0.95 和 0.05 分位点的值。这样一来, 通过简单的数值计算即可得到高斯函数的均值和方差。通过计算, 变换

后人为差错概率隶属度函数的参数如表 5 所示, 其隶属度函数的具体形状如图 3 所示。

表 5 变换后人为差错概率隶属度函数的参数

行为模式	隶属度函数的参数(均值, 标准差)
技能型	(-4, 0.4247)
规则型	(-3, 0.4247)
知识型	(-2, 0.4247)

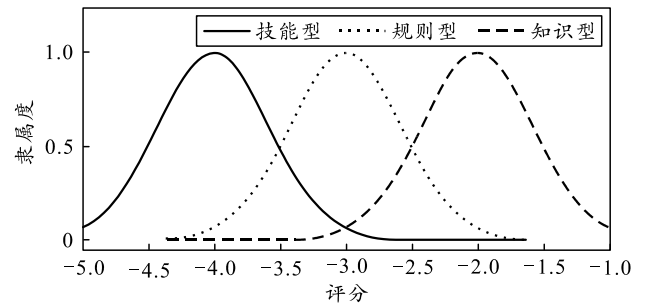


图 3 “变换后人为差错概率”的隶属度函数

确定输出变量变换后人为差错概率的隶属度函数之后, 笔者选择重力中心法作为反模糊方法。需要说明的是, 通过上述模糊逻辑方法得到的结果是变换后的人为差错概率值。为得到真实的人为差错概率值, 还需将得到的结果取以 10 为底的指数, 然后再乘以 5。

通过上述 3 个步骤, 就构建了一种人为差错概率量化方法。从方法的构建过程来看, 该方法综合利用了模糊逻辑方法、行为模式的 Hanaman 决策树确定方法以及 SHARP 方法所提供的人为差错概率区间, 对人的认知行为进行了合理解释, 考虑了任务场景的不确定性, 并能够提供人为差错概率的精确值; 因此, 该方法能够满足人为差错概率量化的基本要求, 是一种合理有效的人为差错概率量化方法。另外, Matlab 中已经建立了现成可用的模糊逻辑工具箱, 该方法使用方便。

3 方法的验证

为验证方法的有效性, 笔者使用该方法对几种任务场景进行分析, 然后将结果与 SHARP 方法进行比较。设有 5 种任务场景, 经过分析人员或专家的评分, 得到行为模式影响因素的评分如表 6 所示。

表 6 5 种任务场景的行为模式影响因素评分结果

场景序号	操作类型	人员对场景的理解程度	规程的需要性	规程的可用性	人员对规程的理解程度	人员对规程的熟悉程度
1	7	8	8	8	9	8
2	3	6	2	7	9	9
3	6	7	5	3	6	7
4	2	4	2	2	1	1
5	1	2	1	4	5	3

对上述 5 种任务场景,使用 Hanaman 决策树方法进行分析,得到行为模式的分析结果如表 7 中第 2 列所示,与行为模式所对应的 SHARP 人为差错概率区间如表 7 中第 3 列所示,使用笔者提出的方法得到人为差错概率值如表 7 中第 4 列所示。

对照表 7 中第 3 列和第 4 列,可以看出模糊逻辑

方法得到的人为差错概率值都在 SHARP 所提供的人为差错概率区间内;因此,可认为笔者提出的人为差错概率量化方法是有效的。由于模糊逻辑方法得到的是人为差错概率的精确值,可直接用于人机系统的概率风险评估,因而比 SHARP 方法更具现实意义。

表 7 2 种行为模式确定方法的分析结果对比

场景序号	Hanaman 决策树法得到的行为模式类型	SHARP 方法的人为差错概率区间	模糊逻辑方法得到的人为差错概率值
1	技能型	$[5 \times 10^{-5}, 5 \times 10^{-3}]$	1.9×10^{-3}
2	技能型	$[5 \times 10^{-5}, 5 \times 10^{-3}]$	3.7×10^{-3}
3	规则型	$[5 \times 10^{-4}, 5 \times 10^{-2}]$	4.4×10^{-3}
4	知识型	$[5 \times 10^{-3}, 0.5]$	1.2×10^{-2}
5	知识型	$[5 \times 10^{-3}, 0.5]$	1.4×10^{-2}

4 结论

笔者提出一种基于模糊逻辑的人为差错概率量化方法。该方法对人的认知行为进行了合理解释,考虑了行为模式影响因素的不确定性,得到人为差错概率的精确值,具有较强的理论合理性和适用性。另外,该方法结合现有工具即可完成,使用方便。

考虑到人为差错数据的不足,笔者通过与 SHARP 人为差错概率区间进行比较的方式对方法的有效性进行验证。这种方式虽然可在一定程度上验证方法的有效性,但论据仍显薄弱;因此,广泛收集人为差错数据对该人为差错概率量化方法的有效性进行验证,将是下一步工作的重点。

参考文献:

[1] DEACON T, AMYOTTE P R, KHAN F I. Human error risk analysis in offshore emergencies[J]. Safety Science, 2010, 48: 803-818.

[2] 李仕林, 饶佳豪, 李蕊, 等. 户外端子箱操作人因可靠性及其风险评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(3): 143-148.

[3] CHANG Y H, WANG Y C. Significant human risk factors in aircraft maintenance technicians[J]. Safety Science, 2010, 48(1): 54-62.

[4] 陈善广, 李志忠, 葛列众, 等. 人因工程研究进展及发展建议[J]. 中国科学基金, 2021, 35(2): 203-212.

[5] SPURGIN A J. Human reliability assessment theory and practice[M]. London: Taylor & Francis Group, 2010.

[6] LEE S M, HA J S, SEONG P H. CREAM-based communication error analysis method (CEAM) for nuclear power plant operators' communication[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011, 24(1): 90-97.

[7] REER B. Review of advances in human reliability analysis of errors of commission-Part 2: EOC quantification[J]. Reliability Engineering and System

Safety, 2008, 93(8): 1105-1122.

[8] CHANG Y H J, MOSLEH A. Cognitive modeling and dynamic probabilistic simulation of operating crew response to complex system accidents, Part 1-5[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2007, 92(8): 997-1101.

[9] KONSTANDINIDOU M, NIVOLIANITOU Z, KIRANOUDIS C. A fuzzy modeling application of CREAM methodology for human reliability analysis[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2006, 91(6): 706-716.

[10] 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.

[11] 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.

[12] REASON J T. Human error[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

[13] 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(11-12): 1067-1077.

[14] KIM J W, JUNG W D, SON Y S. The MDTA-based method for assessing diagnosis failures and their risk impacts in nuclear power plants[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2008, 93(2): 337-349.

[15] HANNAMANN G, SPURGIN A. Systematic human action reliability procedure (SHARP) (EPRI NP-3583)[R]. Electrical Power Research Institute, Palo Alto, California, 1984.

[16] 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.