

概率化认知控制模式下人为差错概率的量化方法*

蒋英杰,孙志强,官二玲,谢红卫

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

摘要:在现有成果的基础上,对 CREAM 方法中的人为差错概率量化进行了改进。介绍了 CREAM 基本法量化人为差错概率的基本思想;讨论了两种概率化认知控制模式的确定方法:贝叶斯网络法和模糊逻辑法,强调了概率化认知控制模式下量化人为差错概率的必要性。通过理论推导,构建了概率化认知控制模式下人为差错概率的量化方法。另外,为了提高计算效率,提供了人为差错概率的 Monte Carlo 仿真算法。通过示例分析,证明了方法的有效性。

关键词:人为差错概率;人因可靠性分析;CREAM 基本法;Monte Carlo 仿真

中图分类号:TP301 **文献标识码:**A

The Method to Quantify Human Error Probability in Probabilistic Cognitive Control Mode

JIANG Ying-jie, SUN Zhi-qiang, GONG Er-ling, XIE Hong-wei

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The quantification of human error probability in CREAM was improved based on available materials. First, the basic method of CREAM was introduced. Second, two methods to determine probabilistic control modes were discussed, which are Bayesian nets and fuzzy logic. The necessity to quantify human error probability in probabilistic control modes was emphasized. Last, the method was proposed to quantify the human error probability in probabilistic control modes by theoretical inference. In order to improve the computing effectiveness, the Monte Carlo algorithm was provided. An example was presented and the validity of the proposed method was proved.

Key words: human error probability; human reliability analysis; CREAM basic method; Monte Carlo simulation

人作为整个人机系统的重要环节,其差错概率直接影响到整个系统的可靠性和安全性。因此,在各种人因可靠性分析方法中,人为差错概率的量化始终是一个备受关注的问题。CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method) 基本法通过认知控制模式,给出了人为差错的概率区间,目前已经用于国际空间站的概率风险评估中^[1-2]。考虑到认知控制模式应该是连续的,而并非离散的 4 种类型,文献[3-4]分别对 CREAM 方法进行了改进,得到的结果是概率化的认知控制模式,这在一定程度上提高 CREAM 方法的科学性。但是,它们没有在概率化认知控制模式的基础上计算人为差错的概率区间以及概率值,作为人因可靠性分析方法,显然不够完整。基于这种考虑,本文提出了概率化认知控制模式下的人为差错概率量化方法,在一定程度上推动了 CREAM 方法的完善和发展。

1 CREAM 基本法

CREAM 方法是由 Hollnagel 于 1998 年提出的,它的基本思想是:任务的情景环境决定人的认知控制模式,而认知控制模式决定了人为差错发生的概率范围。基于这一思想,CREAM 方法定义了 9 个因子作为情景环境的表征,统称为共同绩效条件(Common Performance Condition, CPC),每个因子存在不同的水平,反映了其对人因绩效可能产生的影响。

为了反映情景环境对人认知能力的影响作用,CREAM 方法定义了 4 种类型的认知控制模式:混乱型、机会型、战术型和战略型,并建立情景环境与认知控制模式的关联。针对 4 种认知控制模式,CREAM 方法分别给出了人为差错的概率区间,如表 1 所示。

* 收稿日期:2011-01-15

作者简介:蒋英杰(1981—),男,博士生。

表 1 认知控制模式与差错概率区间

Tab.1 Cognitive control modes and error probability intervals

认知控制模式	差错概率区间
混乱型	$0.1 < P < 1.0$
机会型	$0.01 < P < 0.5$
战术型	$0.001 < P < 0.1$
战略型	$0.000005 < P < 0.01$

CREAM 基本法量化人为差错概率的具体步骤为:首先,根据情景环境,由专家对 9 个 CPC 因子进行评价;然后,根据 CPC 因子的评价结果,并依据情景环境与认知控制模式的关联,确定认知控制模式;最后,根据确定的认知控制模式,对照表 1,得到人在该情景环境中可能发生差错的概率区间。

2 认知控制模式的概率化方法

借助 CREAM 基本法,分析人员可以非常方便地得到人为差错的概率区间。但是,CREAM 对 CPC 因子和认知控制模式的描述仍显不足。一方面,从工程实际来看,情景环境存在着不确定性,对 CPC 因子的评价应该体现这种不确定性;另一方面,从认知心理学来看,人的认知能力也是连续空间,将认知控制模式划分为 4 种离散的类型并不恰当。基于这样的考虑,研究人员提出使用概率的思想来描述人在情景环境中所处的认知控制模式,具体包括贝叶斯网络法和模糊逻辑法。

韩国学者 Kim 于 2006 年提出使用贝叶斯网络的方法,确定 CREAM 方法中的认知控制模式^[4]。该方法认为,表征情景环境的 CPC 因子水平并不是完全确定的。在很多情况下,CPC 因子水平存在不确定性,使用概率化的描述方法更为恰当。由于认知控制模式是基于对 CPC 因子的评价而确定的,这样一来,原有的认知控制模式确定方法也不再适用。论文基于这样的考虑,使用贝叶斯网络构建了 CPC 因子与认知控制模式之间的关联,进而得到了概率化的认知控制模式。同样出于情景环境和认知控制模式应该是连续空间的考虑,孙志强等提出使用模糊逻辑的方法确定认知控制模式,同样得到了人在情景环境中处于 4 种认知控制模式的概率^[3]。

上述两种方法分别通过不同的方式得到了概率化的认知控制模式,其基本形式如表 2 所示。

表 2 概率化的认知控制模式

Tab.2 The probabilistic cognitive control modes

认知控制模式	混乱型	机会型	战术型	战略型
概率	P_1	P_2	P_3	P_4

注: $P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1$

这种概率化的结果更加符合客观实际,对于提升 CREAM 方法的科学性和适用性具有重要作用。需要指出的是,上述这两种方法都止步于得到概率化的认知控制模式,并没有进一步计算人为差错概率区间和概率值。因此,在此基础上增加人为差错概率的量化部分,对于完善现有的方法是非常必要的。

3 人为差错概率的量化方法

概率化认知控制模式是 4 种认知控制模式的概率组合,根据概率论的基本思想,概率化认知控制模式下的人为差错概率密度函数也就是 4 种认知控制模式下人为差错概率密度函数的概率组合。假设 4 种认知控制模式下的人为差错概率密度函数分别为: $f_1、f_2、f_3、f_4$,概率化认知控制模式下的人为差错概率密度函数为 f_{pro} ,则有:

$$f_{pro} = P_1 \cdot f_1 + P_2 \cdot f_2 + P_3 \cdot f_3 + P_4 \cdot f_4 \quad (1)$$

其中, $P_1、P_2、P_3$ 和 P_4 分别为人在情景环境中处于 4 种认知控制模式的概率。

这样一来,只要得到 $f_1、f_2、f_3、f_4$,通过式(1)就可以计算得到概率化认知控制模式下的人为差错概率的密度函数 f_{pro} ,从而就可以完成人为差错概率的量化。

3.1 认知控制模式下人为差错概率的分布

由于人为差错数据很难获得,人为差错概率究竟服从何种分布形式,尚缺乏充分的证据。目前,学术界使用较多的是对数正态分布。Swain 在《THERP 手册》中选择了对数正态分布,并给出了人为差错概率的中值^[5]。文献[6]使用对数正态分布计算人为差错概率值及其上下限。文献[7]分别使用指数分布、威布尔分布、正态分布和对数正态分布,对装甲装备中的人为差错数据进行拟合,结果发现对数正态分布的拟合效果最好。美国、英国的多个模拟机试验数据均表明,对数正态分布是一种理想的分布类型^[8]。可以看出,对数正态分布已经得到研究人员的广泛认可。需要指出的是,对数正态分布的自变量范围为 $[0, +\infty]$,而人为差错概率的范围为 $[0, 1]$,因此,严格来说,对数正态分布并不能用于描述人为差错概率的分布情况,但通过限定人为差错概率 90% 置信度的置信区间范围,可以保证 4 种认知

控制模式所对应的对数正态分布函数在 $[0, 1]$ 范围内的积分都超过 0.9,从而可以将对数正态分布近似作为概率密度函数。基于上述分析,本文选择对数正态分布作为认知控制模式中人为差错概率的分布形式。

从现有资料来看,研究人员普遍将人为差错概率分布的 5% 和 95% 分位点作为人为差错概率区间的上下限文献^[5-6]。对于混乱型认知控制模式来说,其人为差错概率区间为 $[0.1, 1.0]$,很显然不符合这一规则。这里为了便于分析,将其调整为 $[0.1, 0.9]$ 。

这样一来,有了分布形式和概率区间,就可以很容易地确定人为差错概率的具体分布。设人为差错概率的对数正态分布密度函数如式(1)所示:

$$f_{LN}(\theta; \mu, \sigma) = \frac{1}{\theta \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln\theta - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

其中, θ 为人为差错概率, μ, σ 为待估对数正态分布参数。

由于 θ 服从对数正态分布,令 $T = \ln\theta$,则 T 服从正态分布。这样一来, T 的置信度为 90% 的置信区间为 $[\mu - \sigma \cdot u_{0.95}, \mu + \sigma \cdot u_{0.95}]$,其中 $\mu_{0.95}$ 表示标准正态分布的分位数。而 $T = \ln\theta \Rightarrow \theta = \exp(T)$,因此,人为差错概率 θ 置信度为 90% 的置信区间为 $[\exp(\mu - \sigma \cdot u_{0.95}), \exp(\mu + \sigma \cdot u_{0.95})]$ 。对照表 1,设认知控制模式中人为差错概率区间的一般形式为 $[U_1, U_2]$,则有:

$$\begin{cases} \exp(\mu - \sigma \cdot u_{0.95}) = U_1 \\ \exp(\mu + \sigma \cdot u_{0.95}) = U_2 \end{cases} \quad (3)$$

从而

$$\begin{cases} \mu = \frac{1}{2}(\ln U_1 + \ln U_2) \\ \sigma = \frac{\ln U_2 - \ln U_1}{2u_{0.95}} \end{cases} \quad (4)$$

将 4 种认知控制模式的人为差错概率区间分别代入式(4),得到对数正态分布的参数如表 3 所示。

表 3 认知控制模式对应的对数正态分布参数

Tab.3 The lognormal distribution parameters of cognitive control modes

认知控制模式	对数正态分布参数	
	μ	σ
混乱型	-8.4056	2.3104
机会型	-4.6052	1.3998
战术型	-2.6492	1.1891
战略型	-1.2040	0.6697

这样一来,将表 3 中的数据分别带入式(2),就得到 4 种认知控制模式下的人为差错概率密度函数。结合式(1),就可以得到概率化认知控制模式的人为差错概率密度函数 f_{pro} 。

3.2 人为差错概率的计算

通过上述分析,我们已经得到了概率化认知控制模式的人为差错概率密度函数 f_{pro} 。因此,概率化认知控制模式下人为差错概率的中位数 $\mu_{0.5}$ 和 90% 置信度的置信区间 $[\mu_{0.05}, \mu_{0.95}]$ 就可以通过对式(1)进行相关计算得到。考虑到 f_{pro} 不是典型分布,人为差错概率的计算过程难免复杂且效率不高。为此,本文提供了 Monte Carlo 仿真算法,具体步骤如下:

Step 1 从 $[0, 1]$ 中均匀抽样,得到样本 μ 。

Step 2 判断 μ 的范围,若 $\mu \in [0, P1]$,则从混乱型认知控制模式的人为差错概率密度函数 f_1 中抽样,得到样本 x_i ;若 $\mu \in (P1, P1 + P2]$,则从机会型认知控制模式的人为差错概率密度函数 f_2 中抽样,得到样本 x_i ;若 $\mu \in (P1 + P2, P1 + P2 + P3]$,则从战术型认知控制模式的人为差错概率密度函数 f_3 中抽样,得到样本 x_i ;若 $\mu \in (P1 + P2 + P3, 1]$,则从战略型认知控制模式的人为差错概率密度函数 f_4 中抽样,得到样本 x_i 。如果在抽样的过程中,若样本 x_i 的值大于 1,则强制为等于 1。

Step 3 重复 Step 1、Step 2 共 $N(N \geq 1000)$ 次,得到样本 x_1, x_2, \dots, x_N 。

Step 4 将得到的样本从小到大排列,得到 $x_{[1]}, x_{[2]}, \dots, x_{[N]}$,其中,下标表示样本在排列后的位次。这样一来,概率化控制模式的人为差错概率区间为 $[x_{[\lfloor N \cdot 5\% \rfloor }], x_{[\lfloor N9 \cdot 5\% \rfloor }]]$,人为差错概率的中位数为 $x_{[0.5(N+1)]}$ (N 为奇数)或 $0.5 \cdot (x_{[0.5 \cdot N]} + x_{[0.5 \cdot (N+2)]})$ (N 为偶数),其中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整操作。

4 示例分析

文献[4]使用贝叶斯网络进行示例分析,得到的概率化认知控制模式如表 4 所示。这里使用本文提出的方法进一步计算人为差错概率的 90% 置信区间及其中位数。

表 4 概率化认知控制模式示例

Tab.4 An example of probabilistic cognitive control modes

认知控制模式	混乱型	机会型	战术型	战略型
	概率	0.0299961	0.412744	0.516761

由表4可知,概率认知控制模式下人为差错概率的分布函数为:

$$\begin{aligned}
f_{pro}(\theta) = & 0.0299961 \cdot f_{LN}(\theta; -8.4056, 2.3104) \\
& + 0.412744 \cdot f_{LN}(\theta; -4.6052, 1.3998) \\
& + 0.516761 \cdot f_{LN}(\theta; -2.6492, 1.1891) \\
& + 0.0404985 \cdot f_{LN}(\theta; -1.2040, 0.6697)
\end{aligned}$$

按照理论推导的方法对 f_{pro} 进行计算,得到人为差错概率置信度为90%的置信区间为[0.0012, 0.4131],中位数为0.0336。按照Monte Carlo仿真方法进行10000次抽样,得到样本如图1所示。人为差错概率置信度为90%的置信区间为[0.0012, 0.4138],中位数为0.0344。可以看出两种算法的计算结果基本一致,但Monte Carlo仿真算法不需要进行数值积分,因而效率更高。对照表1,人为差错的概率区间和中位数基本位于机会型和战术型认知控制模式的概率区间范围内,与表4中认知控制模式的概率分布是一致的。因此,该方法是有效的。

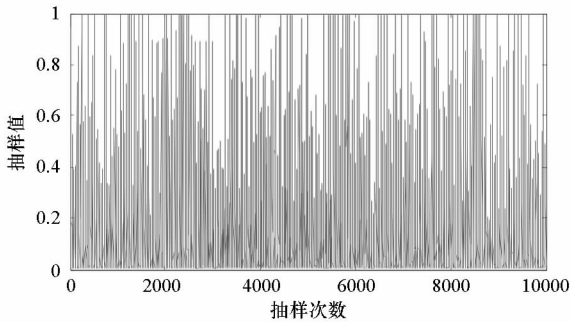


图1 Monte Carlo 仿真算法的抽样样本
Fig. 1 The samples of Monte Carlo simulation algorithm

5 结论

人为差错概率的量化是人机系统概率安全评估的重要环节,也是人因可靠性分析的重要研究

内容。许多人因可靠性分析方法都从不同角度提出了不同的方法。CREAM 基本法利用认知控制模式,构建了一套简便、易用的人为差错概率量化方法。该方法得到了人因可靠性研究领域的普遍推崇,许多学者对此进行了必要的改进,其中,概率化认知控制模式是一项非常有意义的重要改进。本文在此基础上进一步完善,提出使用Monte Carlo 仿真算法计算概率化认知控制模式下的人为差错概率区间和概率值。这一工作对于完善CREAM 基本法的理论基础并使其更有效地应用于工程实践,具有一定的推动作用。

参考文献:

- [1] Hollnagel E. Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)[M]. London: Elsevier Science Ltd., 1998.
- [2] Spurgin A J. Critique of Current Human Reliability Analysis Methods[C]//IEEE 7th Human Factors and Power Plants, Scottsdale, Arizona, 2002; 3. 12 - 3. 18.
- [3] 孙志强, 谢红卫, 李欣欣, 等. CREAM 方法中控制模式分类的模糊方法[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(5): 21 - 26.
- [4] Kim M C, Seong P H, Hollnagel E. A Probabilistic Approach for Determining the Control Mode in CREAM[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2006, 91(2): 191 - 199.
- [5] Swain A D, Guttman H E. Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications (NUREG/CR - 1278) [R]. US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 1983.
- [6] Gertman D I, Blackman H S, Haney L N. INTENT: A Method for Estimating Human Error Probabilities for Decision-based Errors[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1992, 35(2): 127 - 136.
- [7] 刘维平, 曹伟国, 杨立强, 等. 装甲装备中人的可靠性统计与分析[J]. 兵工学报, 2007, 28(1): 83 - 86.
- [8] 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.