

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.1129

基于改进 THERP+HCR 模型的可变功能机械 作业事故人因可靠性分析

杨云霄, 邓益民*

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为保障可变功能机械的安全运行, 提出改进人失误概率预测技术(THERP)+人的认知可靠性(HCR)模型, 用以对可变功能机械作业事故中的安全性问题进行人因可靠性分析(HRA)。首先, 利用 THERP 模型对可变功能机械功能转换过程的各子任务进行风险评估, 并对 THERP 模型进行适应性修正, 再基于此改进模型对操作过程进行定量分析; 其次, 对发生事故时操作人员的事故诊断能力进行研究, 通过引入环境噪声对诊断准确度和诊断速度的影响构建改进的 HCR 模型, 并基于该模型计算诊断过程中的失误概率; 最后, 以联合收割机为案例, 通过对其功能转换过程、事故发生后操作人员的事后认知及诊断过程进行定量分析, 结合两种模型的分析结果计算人因失误概率, 并对结果进行讨论, 验证了所提出方法的可行性。

关键词: 可变功能机械; 功能转换; 人因可靠性; 作业事故

中图分类号: X913.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2025) 03-0035-08

可变功能机械可通过更换配件或者改变配件间的连接方式等手段获得多种不同的功能, 实现“一机多用”的功能效果, 以满足不同作业的任务需求^[1]。但是此类机械也存在一个不足, 即必须由操作人员对设备的相关零部件进行拆装, 以实现不同功能间的切换, 这种操作方式对某些大型、复杂或需要不停机作业的机械系统往往存在着不同程度的可靠性、安全性问题。也正是由于此种原因, 对功能转换过程的研究就尤为重要。随着科技的发展, 可变功能机械的可靠性逐步得到了改善, 但操作人员的作业可靠性却并未同步获得提高。据统计, 机械事故大部分是由人为因素造成的^[2]。鉴于人因失误仍然是造成机械系统工作事故的主要原因之一, 因此研究操作人员的人因可靠性对提高机械系统, 特别是可变功能机械系统的安全性具有重要意义。

人因可靠性分析(Human Reliability Analysis, HRA)是一种针对于人为因素, 对事故序列进行分

析与处理的方法。随着相关研究的发展, HRA 方法种类越来越多, 其中, 人失误概率预测技术(Technique for Human Error Rate Prediction, THERP)模型、人的认知可靠性(Human Cognitive Reliability, HCR)模型等方法都已在 HRA 中得到应用。王洪德等^[3]运用 HCR 模型, 结合 17 个事故事件观察化工公司多名操作人员对异常响应的状况, 并给出改进措施和方案。王全伟等^[4]利用 HCR 模型对异常响应状态下起重机司机的行为建模, 分析操作人员的操作可靠性。陈农田等^[5]基于 THERP+HCR 模型分析航天维修人员的行为过程, 计算出相关人员的人因失误概率, 并根据算例对案例进行计算验证。赵军等^[6]通过改进传统 HCR 模型, 引入班组绩效形成因子, 对核电站安全性进行定量分析。邓明明等^[7]利用 THERP 模型分析了汽车冷媒加注工序的 4 个任务, 验证了 THERP 方法的可行性。张力等^[8]基于 THERP+HCR 模型说明了两种模型的规范化分析程序和文件报告模式, 通过讨论某核电站某

收稿日期: 2024-11-29

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51375246)

第一作者: 杨云霄, 硕士研究生, 主要研究方向: 机械设计理论与方法。E-mail: 3042734933@qq.com

*通信作者: 邓益民, 博士/教授, 主要研究方向: 设计理论与方法、注塑成型与优化。E-mail: dengyimin@nbu.edu.cn

工况条件下的操作人员行为来定量分析设施的安全性。Zhang 等^[9]描述了传统 THERP 模型和 HCR 模型的特点和不足,通过结合两种模型阐述了 THERP+HCR 模型的分析程序和报告构建,最后利用该模型计算出岭澳核电站事故中的人因失误概率。Ye 等^[10]利用 THERP+HCR 模型对国内某核电站主控室操作员在一次回路发生小故障后的失误概率进行了定性分析和计算。

由以上分析可知, THERP 模型和 HCR 模型都已在不同领域有着不同程度的应用。可变功能机械之所以不同于一般普通机械,是由于其在工作中多出了功能转换阶段,所以过程较为复杂。因此笔者提出利用 THERP 模型和 HCR 模型相结合的方法,对可变功能机械的安全性进行人因可靠性分析,并在此过程中对这两个模型进行适应性改进。在功能转换过程中,为分析各子任务动作间的串联和并联间的关系,对传统 THERP 模型加以改进,并以改进的 THERP 模型计算总失误概率。另外,考虑到在可变功能机械作业事故发生时或发生后,操作人员往往会受到由于机械异常运作、警报等引起的噪声影响,进而对准确、快速开展事故诊断产生不利影响,因此在传统 HCR 模型中引入噪声影响因子,构建改进 HCR 模型,然后综合运用改进 THERP+HCR 模型计算出更为准确的操作人员失误概率。

1 改进的 THERP 模型及功能转换过程分析

THERP 模型以事件树模型为基础^[11],通过分析可变功能机械转换过程中操作人员的工作状态,将工作中的各个行为动作记录在事件树中,然后确认异常行为和每个行为分支发生异常的概率,定量分析计算出操作人员操作失误的概率。在利用 THERP 模型求取此概率的计算过程中,有一套针对不同情况的数据表格可供参考,从而能得到较为精确的数据。

1.1 系统信息熟悉阶段

收集并总结操作人员完成指定任务所需的步骤。参考历史故障,分析操作人员的工作过程,识别工作行为中的风险因素。

1.2 定性分析阶段

结合前阶段收集到的信息,将功能转换过程

中操作人员的工作任务分解为一系列子任务。由于各子任务在执行过程中均存在成功和失败两种情况,因此,每个子任务都可以表达成 1 个节点加 2 个分支;将各子任务表达成节点和分支后,按照子任务的执行次序加以连接,即可构造“事件树”或“任务树”。如图 1 所示,图中每个节点表示上个子任务运行的不同结果,例如,子任务 2 对应的 2 个节点分别表示子任务 1 运行成功和失败两种结果。a、A 表示子任务 1 成功、失败; b、B 表示子任务 2 成功、失败;其余依次类推; S、F 分别表示总任务的成功、失败。

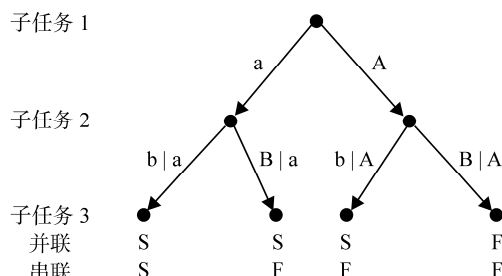


图 1 人因事件树及其串、并联模式

从图 1 事件树可以看到,各子任务由于先后次序不同,其在事件树中的“节点+分支”总个数也不相同。例如子任务 1 作为整个功能转换过程中的首个任务,只需要表达为 1 个“节点+分支”,而子任务 2 作为紧跟任务 1 的后续任务,由于前个任务存在 2 个分支(成功、失败),因此需要表达为 2 个“节点+分支”;以此类推,第 n 个子任务就需要表达为 2^{n-1} 个“节点+分支”。

此外,根据任务性质可将事件树路径划分为并联模式和串联模式。并联模式是指总任务成功与否由各子任务的成功与否以并联方式决定,或者说总任务成功与否是各子任务成功与否的“或”运算结果,也就是只要有一个子任务获得成功,则总任务就算成功。

与此相对应,在串联模式情况下,总任务成功与否由每个子任务的成功与否以串联方式所决定,或者说总任务成功与否是各子任务成功与否的“与”运算结果,也就是必须所有子任务均获得成功,总任务才能最终获得成功。

1.3 定量分析阶段

以图 1 事件树为例,对总任务进行定量分析。

(1) 并联模式下的定量分析。失败路径:子任

务1、2失败。成功路径:子任务1、2成功;子任务1成功、子任务2失败;子任务2成功、子任务1失败。

并联模式下的失败概率: $P(F) = P(A)P(B|A)$; 成功概率: $P(S) = 1 - P(A)P(B|A) = P(a)P(b|a) + P(a)P(B|a) + P(A)P(b|A)$ 。

(2) 串联模式下的定量分析。失败路径:子任务1、2失败;子任务1成功、子任务2失败;子任务2成功、子任务1失败。成功路径:子任务1、2成功。

串联模式下成功概率: $P(S) = P(a)P(b|a)$, 失败概率: $P(F) = 1 - P(a)P(b|a) = P(A)P(B|A) + P(a) \cdot P(B|a) + P(A)P(b|A)$ 。

在事件树模型中,子任务实际人因失败概率 Z_{HEP} (Human Error Probability, HEP)由基本失败概率 Z_{BHEP} (Basic HEP, BHEP)确定。由于人因因素的复杂性,为正确得到子任务的 Z_{HEP} ,需通过系数 Z_{PSF} (Performance Shaping Factor, PSF)进行修正,最后结果可表示为

$$Z_{\text{HEP}} = Z_{\text{BHEP}} \times Z_{\text{PSF}}$$

事件树中的子任务之间具有相关性,前个子任务的成功或失败都会影响当前子任务。因此,对总任务进行定量分析时,应考虑子任务间相关程度。具体相关程度可分为以下5类^[12]:

完全相关(CD): $P(B|A) = 1$,

高相关(HD): $P(B|A) = [1 + P(B)] / 2$,

中相关(MD): $P(B|A) = [1 + 6P(B)] / 7$,

低相关(LD): $P(B|A) = [1 + 19P(B)] / 20$,

零相关(ZD): $P(B|A) = P(B)$ 。

例如,某电动冲击钻在从功能F1(在混凝土墙体中钻孔)切换到功能F2(剥离混凝土墙体表层)的过程中,涉及2个子任务,子任务1是拆卸下电钻头,子任务2是安装上电镐头。经分析,在功能转换过程中,操作人员基本失误概率为 P_1 , $Z_{\text{PSF}} = 2$,则修正后的实际人因失误概率 $P_2 = 2P_1$ 。考虑子任务间的相关程度为高相关(HD),据此计算操作失误概率 $P_0 = [1 + P_2] / 2 = 0.5 + P_1$ 。

1.4 改进后的 THERP 模型

现有 THERP 模型在利用事件树对工作人员的操作过程进行定性分析时,一般认为事件树子任务之间的路径都为串联模式,或者都为并联模式。

例如,王圣辉等^[13]通过构建事件树对角磨机转换为电锯功能的过程进行分析,将功能转换整个过程分为6个子任务,并且认为在事件树中的6个子任务间的关系都为串联。张建祥等^[14]在分析2架飞机相撞事故中,认为事件树中的5个子任务间的关系都为并联。考虑到可变功能机械的功能转换阶段较为复杂,子任务路径间的关系既可能是串联,也可能为并联,因此需同时结合串联、并联两种模式对功能转换过程的各子任务进行定性分析,来提高人因失误概率的准确性。

因此,在传统 THERP 模型中引入串联、并联混合的事件树路径划分方法,并将事件树中的串联合并路径以实线表达,并联路径以虚线表达。以图1为基本案例来进行扩展,假定子任务3与子任务4是并联模式,其他均为串联模式,并且任务1必定成功,则改进后的事件树如图2所示。此时,失败路径为4、5、6、7、8。

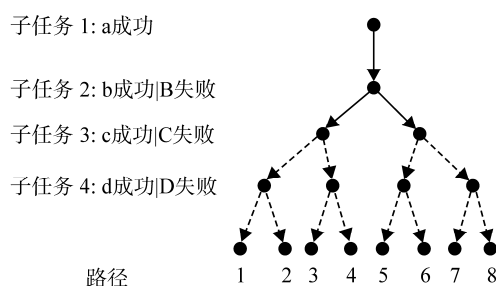


图2 改进的人因事件树串并联模式

由此可见改进的 THERP 模型在事件树表达上以虚实线区分了不同路径,且以单线表达必定成功的子任务完成情况(必定失败情况则无需表达),使得新模型具有如下特点:(1)既能表达不确定性任务的完成情况,也能表达确定性任务的完成情况;(2)在计算总失误概率时,既能处理完全串联或完全并联模式,也能处理串并联混合模式。因此,文中新模型相对于传统 THERP 模型具有更好的适用性。

2 HCR 模型及引入噪声因素的改进 HCR 模型

2.1 HCR 模型的行为类别

HCR 模型以操作人员在设备发生故障或事故时对异常响应(包括异常诊断并采取措施等)的认知与心理状态为基础^[15],定量评价操作人员成功响应的概率。对可变功能机械而言,操作人员在日

常机器作业和功能转换过程中,均可能出现各种各样的设备故障或突发事件等异常情况。因此,有必要对操作人员响应异常情况的失败概率进行分析计算,以便为进一步的产品设计改进提供基础数据。

HCR 模型适用于设备出现异常情况后,操作人员须在允许时间内予以正确的响应。操作人员响应动作的行为类别分为以下 3 种^[6]:

(1) 技能型: 操作人员接受过良好的工作培训,工作经验丰富,可熟练地对异常状态进行响应。此类行为特征为“熟能生巧”。

(2) 规则型: 操作人员接收和识别异常响应后,能根据现有规程进行响应。此类行为特征为“说明书”。

(3) 知识型: 操作人员具有良好知识储备,能对全新异常状态实施信息收集、异常诊断、执行反馈等综合行为。此类行为特征为“随机应变”。

2.2 HCR 模型的威布尔分布

HCR 模型认为在接收到异常信息后,操作人员响应失败的概率 P 符合威布尔分布,算式如下:

$$P = e^{-[(t/t' - \gamma)/\alpha]^\beta} \quad (1)$$

式中: α 、 β 、 γ 是与行为类别有关的参数; e 为自然常数; t 是事故发生后,允许操作人员响应的时间; t' 为操作人员完成响应的执行时间中值。

由式(1)可看出,响应失败概率 P 的数值与允许操作人员响应时间 t 和执行时间的中值 t' 有关,且受到有关参数 α 、 β 、 γ 的影响。

使用 HCR 模型对异常响应定量分析过程如下:

(1) 参数 α 、 β 、 γ 大小仅取决于行为类别。可根据操作人员在异常情况发生后的响应行为来确认行为类别,具体通过查询表 1 确定参数 α 、 β 、 γ 的取值^[17]。

表 1 α 、 β 、 γ 参数选取表

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

(2) 通过数据收集或专家问访,确认操作人员正常情况下一般的执行时间 t'_n 。

(3) 由于人因因素的复杂性,计算执行时间中值 t' 大小时,需考虑操作人员经验、应激水平、人

机界面等行为形成因子,算式如下:

$$t' = t'_n(1 + K_1)(1 + K_2)(1 + K_3) \quad (2)$$

式中,操作人员经验(K_1)、应激水平(K_2)、人机界面(K_3)的大小仅与操作人员有关。通过对操作人员异常响应的考察,由表 2 确认 K_1 、 K_2 、 K_3 取值^[18]。

表 2 HCR 模型行为形成因子及修正系数

行为形成因子		修正系数
操作人员经验 (K_1)	1.培训良好	-0.15
	2.培训及格	0
	3.培训不够	0.44
应激水平 (K_2)	1.严重应激	0.60
	2.普通应激	0.28
	3.低应激	0.20
	4.潜在应激	0
人机界面 (K_3)	1.优秀	-0.22
	2.良好	0
	3.中等	0.44
	4.差	0.78

(4) 将各项数据代入式(1),计算操作人员响应失败概率 P 。

2.3 改进后的 HCR 模型

噪声是由物体无规则振动而产生的声音,凡是对人的生活或工作产生影响的声音都是噪声。噪声会直接影响人的听觉和心理状态,对工作人员的行为绩效产生影响。在设备发生故障或事故时,操作人员需要及时对故障进行诊断,以便及时采取必要措施。在此过程中,警报声和机器工作时发出的噪声会对操作人员的诊断准确度和诊断速度产生影响。诊断准确度影响因子和诊断速度的影响因子可按照表 3 进行取值^[19],表中, Q_1 为噪声对诊断准确度的影响因子, K_4 为噪声对诊断速度的影响因子。其中,噪声对口头沟通时诊断速度的影响程度认为无影响。考虑到噪声对操作人员行为的影响,在代入与噪声相关影响因子后,改进后算式分别为式(3)和式(4)。

表 3 噪声对人员行为的影响

行为类型单元	Q_1	K_4
对数值的诊断	-0.31	-0.17
对信息及问题的诊断	-0.10	-0.34
读沟通及写沟通	-0.24	-0.01
口头沟通	-0.29	

$$P_3 = e^{-[(t/t' - \gamma)/\alpha]\beta} \times (1 - Q_1) \quad (3)$$

$$t' = t'_n(1 + K_1)(1 + K_2)(1 + K_3)(1 - K_4) \quad (4)$$

3 可变功能机械的改进 THERP + HCR 分析模型

与传统机械设备不同,可变功能机械的人因故障或作业事故既可发生在机器正常运行阶段,亦可发生在功能切换阶段,因此在进行人因可靠性分析时,需要针对该两个阶段分别进行处理。前述的 THERP 模型和 HCR 模型均可用于这两个阶段,其中 THERP 模型可用于故障发生前,对操作人员一系列的行为失误进行预判,与时间无关^[20]。考虑到正常运行情况下的可变功能机械与普通机械设备并无本质差异,因此笔者将重点针对功能转换过程中的特殊阶段开展人因行为失误分析。另一方面,因为 HCR 模型与时间高度相关,适用于计算可变功能机械作业事故后,操作人员因时间压力、应激状态等人因因素影响,在有限时间内相应失败的概率。此分析既适用于正常运行阶段,也适用于功能转换阶段,因此在应用 HCR 模型进行设备故障或作业事故后的响应情况分析时,无须区分可变功能机械的两个不同阶段。

基于以上考虑,将改进 THERP 模型和改进 HCR 模型分别用于可变功能机械人因故障分析的不同阶段,构建改进 THERP+HCR 分析模型。

具体来说,操作人员在机械作业过程中的一系列行为可分为操作行为、认知行为、诊断行为三部分。其中,操作行为通常指故障发生前,操作人员对机器产生的所有相关动作或指令;认知行为和诊断行为指故障发生后,操作人员对机器故障或作业事故的认知、诊断等相关行为。正是操作人员存在这些不同的行为,因此需要运用不同模型分别对人因失误进行分析。

针对可变功能机械发生故障或作业事故前的情况,可以利用改进 THERP 模型对功能转换过程中人员的操作行为进行分析,计算其操作失误概率。针对发生故障或作业事故后的情况,由于操作人员的认知行为和诊断行为不仅受到行为形成因子影响,亦会受到噪声等外部环境影响,因此可使用改进的 HCR 模型对这些行为过程进行定量分析。图 3 则显示了改进 THERP+HCR 模型的分析过程。

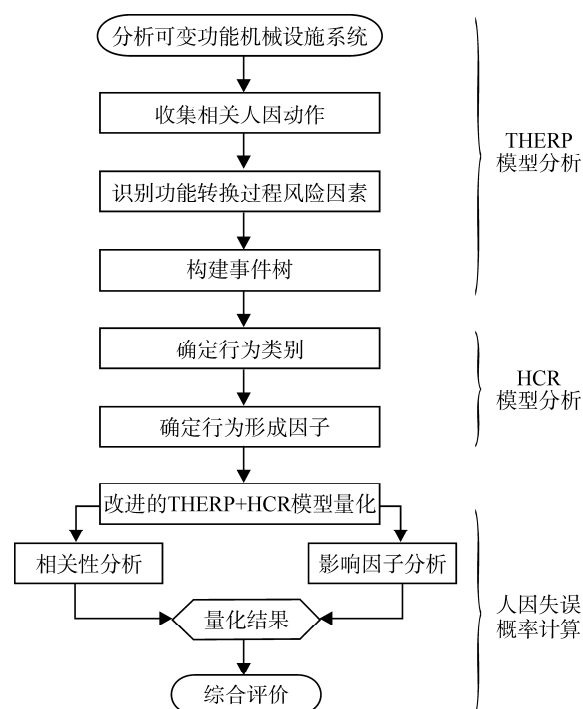


图3 改进 THERP+HCR 模型对操作人员行为的分析过程

4 实例分析

4.1 案例

一机多用联合收割机是一种可以在多种不同功能间进行切换的可变功能机械系统,通过更换不同割台收割小麦、玉米、豆类等不同农作物。操作人员在使用该联合收割机时,涉及以下一些作业行为。

(1) 机器发生故障前的操作行为。考虑到可变功能机械功能转换过程的特殊性,重点考虑操作人员从一种收割功能切换到另一种收割功能时的“功能切换操作”。例如收割玉米前,操作人员需将收割其他农作物的当前割台拆卸下来,安装上玉米割台。

(2) 机器发生故障后的认知行为和诊断行为。当收割机连续工作时,发动机偶尔会出现过热,操作人员诊断事故,并立即启动相应的冷却维护措施。若操作人员未能在有限时间内正确响应,将导致发动机损坏,从而造成一定程度的经济损失。

(3) 事故发生时,收割机机身中的热感应装置在 60 s 后响应并发出警报,操作人员接收到警报信息后,分析评估系统异常状态,诊断过程所需时间为 30 s。事故发生后,若操作人员在 3 min 内完成冷

却操作，即可认为响应成功。

本案例中，操作人员接收到警报信号后，识别和诊断异常工况，做出相应补救措施。在分析操作人员行为时，增加噪声影响因子，利用改进 HCR 模型定量分析操作人员在异常工况下的响应行为。操作人员行为分析可分为三个阶段：(1) 基于改进的 THERP 模型运用事件树模型将操作人员在收割机功能转换阶段的总任务分为一系列子任务，计算各子任务失败概率以及总操作失误概率 P_1 ；(2) 操作人员接收到警报信号后，意识到收割机工作异常，此时认知失误概率为 P_2 ；(3) 操作人员在紧急状况下，诊断结果会受到工作经验、心理应激水平、人机界面等影响，则可利用改进 HCR 模型计算诊断失误概率 P_3 。

4.2 操作失误概率 P_1

4.2.1 确定各子任务

通过分析操作人员更换割台过程的行为，可将此操作过程分为以下 5 个子任务：

- 子任务 1：使用航吊机吊起当前割台；
- 子任务 2：拆除串销，卸下当前割台；
- 子任务 3：使用航吊机吊起玉米割台；
- 子任务 4：将玉米割台对接到机身；
- 子任务 5：安装串销，固定割台。

4.2.2 风险等级分析

风险矩阵是 THERP 模型定性分析中常见的方法之一。计算各子任务失误概率时，可用风险矩阵确定可忽略风险的子任务。根据表 4，经过调研统计可认为子任务 1、3 必定成功。

表 4 各子任务的风险矩阵分析

失误概率严重度	轻微	中等	严重	非常严重
概率非常低	1、3			
概率低			2、5	
概率中等		4		
概率高				

4.2.3 确定事件树模型

建立事件树模型，可认为子任务 1、2、3 间的连接关系为串联，子任务 4、5 间的连接关系为并联。在不考虑子任务 1、3 失败路径的情况下，子任务 2、4、5 分别对应成功和失败两种路径。

如图 4 所示，事件树模型中共 8 种路径，其中有 5 条失误路径。路径 1：子任务 1、2、3 成功，子

任务 4、5 失败；路径 2：子任务 1、3、4、5 成功，子任务 2 失败；路径 3：子任务 1、3、4 成功，子任务 2、5 失败；路径 4：子任务 1、3、5 成功，子任务 2、4 失败；路径 5：子任务 1、3 成功，子任务 2、4、5 失败。

- 子任务 1: a成功
- 子任务 2: b成功|B失败
- 子任务 3: c成功
- 子任务 4: d成功|D失败
- 子任务 5: e成功|E失败

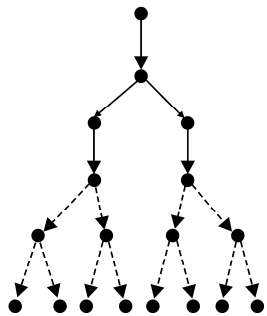


图 4 收割机案例的事件树模型

通过走访专家或收集相关数据，假定最后确定子任务 2、4、5 的失败概率分别为 0.002、0.005、0.001，则可以计算每条失误路径的概率依次为

$$\begin{aligned} P(F_1) &= P(E|D|c|b|a) = 1 \times 0.998 \times 1 \times 0.005 \times 0.001 = 4.990 \times 10^{-6} \\ P(F_2) &= P(e|d|c|B|a) = 1 \times 0.002 \times 1 \times 0.995 \times 0.999 = 1.988 \times 10^{-3} \\ P(F_3) &= P(E|d|c|B|a) = 1 \times 0.002 \times 1 \times 0.995 \times 0.001 = 1.990 \times 10^{-6} \\ P(F_4) &= P(e|D|c|B|a) = 1 \times 0.002 \times 1 \times 0.005 \times 0.999 = 9.990 \times 10^{-6} \\ P(F_5) &= P(E|D|c|B|a) = 1 \times 0.002 \times 1 \times 0.005 \times 0.001 = 1.000 \times 10^{-8} \end{aligned}$$

各路径失败总概率：

$$\begin{aligned} P(F) &= P(F_1) + P(F_2) + P(F_3) + P(F_4) + P(F_5) \\ P(F_5) &= 0.002\ 004\ 98 \end{aligned}$$

考虑操作人员有较好的工作经验，在低应激异常情况下，根据表 5^[5]，取修正系数 $Z_{PSF} = 2$ 。

表 5 有经验操作人员不同应激条件下的修正系数

应激水平	修正系数	不确定范围
较低应激	2	2 倍
最佳应激	1	1 倍
中等偏高应激	2~5	2~5 倍

相关程度可认为低相关(LD)，据此计算操作失误概率为 $P_1 = [1 + 19P(F)] / 20 \times 2 = 0.103\ 8$ 。

4.3 认知失误概率 P_2

由于操作人员接受过良好的岗前培训，且积

累了足够的工作经验,可认为对警报认知失误概率非常小,取 $P_2 = 0.0001$ 。

4.4 诊断失误概率 P_3

操作人员接收到过热警报后,按照规程对异常状态进行响应,该行为类别为规则型,根据表 1,取 $\alpha = 0.601$, $\beta = 0.9$, $\gamma = 0.6$ 。

事故发生后,操作人员进入紧急处理状态。由于害怕失误造成的后果,操作人员出现紧张心理。根据表 2,取行为形成因子修正系数 $K_1 = -0.15$, $K_2 = 0.20$, $K_3 = -0.22$ 。

完成一系列行为总时间 $t_0 = 180$ s,事故发生至警报响起,共需时间 $t_1 = 60$ s,操作人员一般诊断所需时间 $t'_n = 30$ s,允许操作人员的响应时间为 $t = t_0 - t_1 = 120$ s。

考虑噪声对诊断速度的影响因子,根据表 3,取 $K_4 = -0.34$,根据式(4),计算诊断执行时间中值:

$$t' = t'_n(1 + K_1)(1 + K_2)(1 + K_3)(1 - K_4) = 31.98 \text{ s}$$

考虑噪声对诊断准确度的影响因子,取 $Q_1 = -0.10$,根据式(3),计算诊断失误概率 P_3 :

$$P_3 = e^{-[(t/t' - \gamma)/\alpha]\beta} \times (1 - Q_1) = 0.0129$$

4.5 结果分析

(1) 综合分析结果可知,操作人员操作失误概率 P_1 为 0.1038,认知失误概率 P_2 为 0.0001,诊断失误概率 P_3 为 0.0129。由数据可以看出,认知失误概率远小于另外两者。因此,在改善收割机安全性问题上,应针对功能转换的操作过程和事故后的诊断过程作出更多思考。

(2) 操作失误概率 P_1 在人因失误总概率中占比最大,风险最高,其体现的是操作人员能力水平、经验积累及心理成熟能力,这就要求公司对员工能力及心理素质加以严格培养。

(3) 认知失误概率 P_2 主要受操作人员工作经验的影响。因此为降低 P_2 ,应该为员工提供良好的岗前培训,以提高操作人员的认知水平。

(4) 诊断失误概率 P_3 受人为因素影响,为降低 P_3 ,应尽量减小 t' 的数值。 K_1 是操作人员接受培训的水平。 K_2 指在应激状态下,操作人员的情绪波动,与其心理素质有关。 K_3 表示员工与机械的配合程度。根据式(3)降低 K_1 、 K_2 、 K_3 可显著减小诊断时间中值,进而降低诊断失误概率。为减小噪声及其他环境因子的影响,应对收割机进行定期保养或

考虑更换新设备。

5 结论

由于人因因素的复杂性,对机械设备的人因可靠性分析存在一定难度,而可变功能机械相较于一般机械存在一定特殊性,其不仅有正常的作业过程,还需要操作人员根据需要自行进行相关零部件的拆装,以实现不同功能间的转换。针对此特定机械系统,将操作人员的工作过程分为三个阶段:操作阶段、认知阶段、诊断阶段。首先,提出改进 THERP 模型,并据此对可变功能机械功能转换过程进行定量分析,收集相关数据并计算操作失误概率。其次,通过对行为类别、行为形成因子的分析,增加噪声影响因子,构建改进 HCR 模型,然后利用改进 HCR 模型分析操作人员的认知和诊断过程,计算出认知和诊断失误概率。通过将两个改进模型应用于可变功能机械人因可靠性分析的不同情境中,构建了改进的 THERP + HCR 模型,并以一机多用联合收割机为案例,验证了所提出方法的可行性。

需要指出的是,使用 HCR 模型定量分析时,对操作人员的一般执行时间、行为形成因子的判断主要由相关领域专家或相关案例数据给出,具有一定的主观性。未来研究中,应收集更多相关案例,扩大案例数据规模,以提高数据选取的客观性和准确性。

参考文献:

- [1] 邹长武,邓益民,王根华. 可变功能机械产品功能设计及功能转换过程研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(23): 62-68.
- [2] 黄曙东,戴立操,张力. 核电站事故前人因可靠性分析方法[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(2):56-59.
- [3] 王洪德,高玮. 基于人的认知可靠性(HCR)模型的人因操作失误研究[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(7):51-56.
- [4] 王全伟,徐格宁,文豪. 起重机司机行为建模与操作可靠度分析[J]. 人类工效学, 2016, 22(3):58-65.
- [5] 陈农田,马婷,李瑞. 基于 THERP+HCR 的航空维修差错人误概率计算[J]. 人类工效学, 2016, 22(6):59-63.
- [6] 赵军,童节娟,刘涛,等. 核电厂传统人员可靠性分析方法中引入班组因素的研究[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(8):966-971.

- [7] 邓明明, 朱郭奇. 检验 THERP 合理性及不足的实验研究: 以汽车冷媒加注工序为例[J]. 工业工程, 2019, 22(1):85-89.
- [8] 张力, 黄曙东, 黄祥瑞. 基于 THERP+HCR 的人因事件分析模式及应用[J]. 核动力工程, 2003, 24(3):272-276.
- [9] ZHANG L, HUANG S D, HUANG X R, et al. THERP+HCR: model and application[C]//Proceedings of the 6th Pan-Pacific Conference on Occupational Ergonomics. 2001:323-326.
- [10] YE J L, JIE H. An evaluating method of small LOCA in primary circuit in nuclear power plant (NPP) based on HCR plus THERP[C]//Proceedings of the 5th International Symposium on Symbiotic Nuclear Power Systems (ISSNP2013). 2013:5.
- [11] SWAIN A D, GUTTMANN H E. Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear plant application[R]. Rockville, USA: US Nuclear Regulatory Commission 1983.
- [12] 童节娟, 余少杰, 赵军. 核电站人员可靠性分析方法 THERP 中的班组因素[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(9):1425-1428.
- [13] 王圣辉, 贺华波. 基于 THERP 可变功能机械功能转换过程评价[J]. 宁波大学学报(理工版), 2023, 36(3):50-56.
- [14] 张建祥, 甘旭升, 吴亚荣, 等. 空管人因失效概率的 THERP-CREAM 预测方法[J]. 航空工程进展, 2022, 13(6):59-68.
- [15] 隋东, 韩明良, 董襄宁, 等. 空中交通管制员认知可靠性研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(3):384-387.
- [16] 方向, 赵炳全. 核电厂操纵员认知可靠性研究模型的选择与实验[J]. 核科学与工程, 2000, 20(1):18-24.
- [17] 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):9-19.
- [18] 马成正, 蓝志江. 基于人的认知可靠性模型(HCR)的接车进路办理诊断时间的研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(7):30-34.
- [19] 邹树梁, 黄斌海, 李书帆. 海上浮动核电站人员认知可靠性模型[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(1):1-6.
- [20] 黄曙东, 张力. THERP+HCR 分析方法时间接口研究[J]. 人类工效学, 2002, 8(1):5-7, 22.

Human reliability analysis of adaptable-function machinery operation accidents based on improved THERP+HCR models

YANG Yunxiao, DENG Yimin

(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To ensure safe operation of the adaptable-function machinery, an improved THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) + improved HCR (Human Cognitive Reliability) model is proposed to conduct human reliability analysis (HRA) on the AFM's (Adaptable-Function Machinery) operation accidents. First, the THERP model is applied to evaluate the risks of each subtask in the function-switching process of the AFM, during which the THERP model is adapted to better suit the scenario. Based on the adapted THERP model, the function-switching process of the AFM is quantitatively analyzed. Secondly, the human response capability on accident diagnosis is studied, which is necessary for the safety evaluation at occurrence of operation accidents. A noise factor is introduced to the HCR model to take into account the influence of environmental noises on the speed and accuracy of accident diagnosis, with which an improved HCR model is constructed. By applying this model, the probability of diagnostic process errors can be calculated. Finally, a combinational harvesting machine is taken as an example for case study. A quantitative analysis is conducted on both the function-switching process of the machine, as well as the cognitive and diagnostic processes of human response at accident occurrence. By combining the analysis results of the two models, the probability of human error is calculated and discussed, which demonstrated the feasibility of the presented method.

Keywords: adaptable-function machinery; function-switching process; human reliability; operation accident

(责任编辑 章践立)