

情景环境与人为差错的对应关系分析方法

蒋英杰, 孙志强, 宫二玲, 谢红卫

(国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 提出了一种分析情景环境与人为差错之间对应关系的方法。将情景环境分为操作者、机器、任务、组织、环境和辅助系统6个方面,建立了包含38个元素的行为形成因子分类方法,为人为差错成因的查找提供了参考模板。在SRK(skill-based, rule-based and knowledge-based)模型的基础上引入疏忽/遗忘/错误分类框架,将人为差错分为技能型疏忽、技能型遗忘、规则型疏忽、规则型错误以及知识型错误等5种基本的人为差错类型。使用灰色关联分析方法,从“结果-原因”和“原因-结果”两个方向分析行为形成因子与人为差错类型之间的关联关系。通过分析可以得到,与特定人为差错类型相关的各种行为形成因子的排序以及特定行为形成因子所可能诱发的各种人为差错类型的排序。通过示例分析表明,该方法是一种分析情景环境与人为差错之间对应关系的有效方法,可以为人为差错的预测和预防提供重要的指导。

关键词: 行为形成因子; 人为差错; 灰色关联分析; 人因可靠性分析

中图分类号: TP 913.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.12.38

Method for correlation analysis between scenario and human error

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

(College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A new method is proposed to analyze the correlation between scenario and human error. The scenario is decomposed into six aspects, which are operator, machine, task, organization, environment and assistant devices. Based on the scenario decomposition, a taxonomy of performance shaping factor is constructed, which includes thirty-eight items and can provide a reference template for the investigation of human error causes. Based on the skill-based, rule-based and knowledge-based (SRK) model, the slip/lapse/mistake framework is introduced to classify human errors, which are categorized as skill-based slip and lapse, rule-based slip and mistake, and knowledge-based mistake. Grey relational analysis is introduced to analyze the correlation between performance shaping factors and human error types, in which the correlations of “consequent-antecedent” and “antecedent-consequent” are both analyzed. By this method, performance shaping factors related to some specified human error type and human error types caused by some specified performance shaping factor both can be sorted according to their correlation degrees. A case study is provided, which shows that the proposed method is applicable in analyzing the correlation between scenario and human error, and can provide some important implications for human error prediction and human error reduction.

Keywords: performance shaping factor; human error; grey relational analysis; human reliability analysis

0 引言

在人因可靠性分析领域,“人为差错是由人所处的情景环境诱发的”这一观点已经得到广泛认同,并且已经作为理论基础运用于人为差错相关分析方法的开发中^[1-3]。但是,情景环境是如何诱发人为差错的,即人为差错的发生机理问题,仍然

是一个悬而未决的问题。由于人的认知行为过程是异常复杂的,同时受制于行为科学、认知心理学等相关学科的发展水平,从理论层面对人为差错的发生机理进行描述是非常困难的。考虑到在工程实践中,各个工业部门都会积累一定数量的人为差错数据,而这些人为了人为差错数据通常会包含人为差错的原因及后果信息。因此,不妨换个角度,将情景

环境作为原因,将人为差错作为结果,通过一定的数据统计方法分析人为差错原因和结果之间的对应关系。这样就可以跳过对人认知过程细节的探究,以宏观的方式描述人为差错发生的规律性。

目前,情景环境与人为差错的对应关系分析,已经受到了人因可靠性研究人员的普遍关注,相关研究成果陆续出现。在理论分析方面,Hollnagel 在 CREAM (cognitive reliability and error analysis method)方法中对人为差错和成因进行了分类,并初步建立“后果-前因链”^[4]。后来,沈祖培等通过对 CREAM 方法的改进,提出了更为详尽的人为差错后果-前因追溯表^[5]。此外,Chang 等通过分析行为形成因子的特点,得到了行为形成因子对人行为的影响效果列表^[6]。Deere 等同样分析了行为形成因子对人行为的影响,并将结果应用于舰船的设计上^[7]。在数据分析方面,罗晓利和李蒙等使用灰色关联分析方法分别对核电站和空中交通管制中的人为差错数据进行了分析,得到了人为差错与成因之间的关联^[8-9]。Chang 等运用问卷调查的方法,得到了行为形成因子对人为差错的影响程度排序^[10]。这些研究成果,都在一定程度上描述了情景环境与人为差错之间的对应关系,可以为人为差错成因的查找和制定相应的人为差错规避措施提供有益的指导,但都存在不同程度的缺陷。一方面,对于理论分析方法来说,它们得到的结果只是非常初步的关联关系,而没有进一步对人为差错与行为形成因子之间的关联性进行排序;另一方面,对数据分析方法来说,它们只分析了“结果-原因”的对应关系,而没有进一步研究“原因-结果”的对应关系,而且它们将人为差错作为整体来考虑,没有考虑不同人为差错类型所对应差错成因之间的差异性。因此,现有方法对情景环境与人为差错之间对应关系的分析尚不成熟,对工程实践的指导意义也受

到了很大的限制。

基于上述分析,本文拟构建一种新的分析情景环境与人为差错类型之间对应关系的方法,使之可以考虑不同人为差错类型的特点,并能够同时对“结果-原因”和“原因-结果”两种对应关系进行分析。这样就可以完善现有方法,为人为差错的管理提供更加有效的指导。新方法包括 3 个部分:情景环境的描述、人为差错的分类以及情景环境与人为差错的关联分析方法。

1 情景环境的规范化描述

通常来说,情景环境是非常复杂的,采取一定的方式对情景环境进行合理描述是必要的。在人因可靠性分析中,研究人员普遍使用行为形成因子作为情景环境的表征,其含义是指那些能够对人的行为产生影响的各种因素^[11]。考虑到情景环境的复杂性,通常需要使用数目较多的行为形成因子。因此,情景环境描述的全面性和规范性就显得非常重要。

从人机交互过程来看,操作人员一般需要在一定的组织氛围和物理环境中,通过操纵机器来完成一定的任务。在这个过程中,操作者、机器、任务、组织、环境相互作用共同诱发了人的行为。另外,操作者在执行任务的过程中通常需要借助其他的辅助系统,如规程、工具以及其他协助人员等。因此,辅助系统也是影响人行为的一个重要方面。这样一来,将情景环境划分为操作者、机器、任务、组织、环境和辅助系统等 6 个方面较为合理。这 6 个方面基本可以全面涵盖整个情景环境,经过进一步细化分析,可以得到每个方面所含的行为形成因子具体元素,这样就构建了情景环境的规范化描述模板,具体如表 1 所示(关于行为形成因子具体元素的解释,可以参考文献[12-13,10])。

表 1 情景环境的规范化描述模板

行为形成因子大类	行为形成因子小类	行为形成因子具体元素
操作者	自然特性	(1)性格 (2)体力 (3)精力(4)态度 (5)动机 (6)自然技能
	工作特性	(1)知识 (2)经验
机器	显示设备的特性	(1)显示仪表的形状颜色 (2)显示仪表的显示方式 (3)显示仪表的布局 (4)显示信息的质量
	控制设备的特性	(1)控制设备的布局 (2)控制设备的可操纵性 (3)控制设备的自动化水平
任务	单任务特性	(1) 可用任务时间 (2)任务的复杂性 (3)任务的新颖性 (4)任务的后果
	多任务特性	(1)任务的数量 (2)任务之间的相关性
组织	组织气氛	(1)管理制度 (2)安全文化
	任务的组织安排	(1)人员配备 (2)任务责任划分 (3)值班制度
环境	自然环境	(1)声音 (2)光照 (3)温度(4)湿度 (5)振动 (6)空气质量
	工作场景	(1)舒适性 (2)安全性
辅助系统	辅助设备	(1)规程 (2)工具
	辅助人员	(1)监督人员 (2)其他协助人员

2 人为差错的分类

一般来说,机电产品的差错一般只表现为“失效”一种情形,而人的差错则可能表现为多种不同的人为差错类型,如忘记执行动作、执行了无关的动作、执行了错误的动作

等。不同类型的人为差错通常是由不同的差错成因导致,因此为了分析情景环境与人为差错的对应关系,对人为差错进行分类是必要的。本文引入 SRK (skill-based, rule-based and knowledge-based)模型来描述人的行为过程,通过分析不同行为模式的特点,对人为差错进行分类。

SRK 模型是由 Rasmussen 提出的用于描述人的认知行为过程的,该模型将人的行为按照行为水平分为 3 种行为模式:技能型、规则型和知识型^[14],其基本结构可以用图 1 来表示。

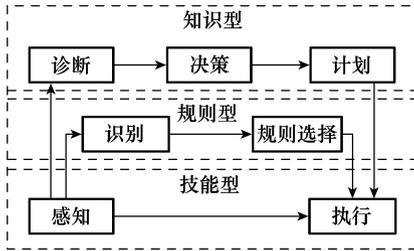


图 1 SRK 模型

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认知行为模式,即:操作人员在应激后立即做出反应。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,所采取的一种认知行为模式。在该种认知行为模式中,操作人员在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,所采取的一种认知行为模式。在这种认知行为模式中,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刺激信息进行分析、诊断并做出相应的任务计划。

通过上述定义可以看出,SRK 模型体现了人行为过程的基本特点和差异性,具有较强的理论合理性,由于我们关注的是人行为表现中的人为差错部分,因此还必须对 3 种行为模式下所可能出现的人为差错类型作进一步分析。

疏忽/遗忘/错误是由 Reason 于 1990 年提出的,是人因可靠性分析中的一种非常重要的人为差错分类方法^[15]。该分类方法着重从意图的角度出发,对人为差错进行了分类。其中,疏忽是指“意图正确,但执行了错误的动作”;遗忘是指“意图正确,但没有执行任何动作”;错误是指“意图是错误的,执行的动作也是错误的”。需要说明的是,这里的意图错误是指操作人员由于知识能力所限,没有对情景环境做出正确的判断,从而导致了诊断/决策错误。对于故意性的意图错误,由于其产生的原因很难控制,因此在人因可靠性分析中,这类人为差错通常是不予考虑的。从忽略/遗忘/错误分类方法的描述来看,该分类方法可以很好地体现人为差错类型的差异性,因此可以作为行为模式中人为差错分类的基本框架。

对于技能型行为模式来说,由于操作人员对任务非常熟练,意图正确是可以保证。因此,只可能发生除了错误之外的另两种差错。这样一来,技能型行为模式中的人为差错可以分为:技能型疏忽和技能型遗忘。

对于规则型行为模式来说,操作人员的行为主要发生在规则的选择和执行上。因此可能发生“选择了错误的规程”和“选择了正确的规程,但在执行中出现错误”两种人为差错情形。按照疏忽/遗忘/错误的分类框架,将两种人为差错情形分别定义为规则型错误和规则型疏忽。

对知识型行为模式来说,由于操作人员需要完全依赖自身的知识能力对各种信息进行分析、诊断并做出相应的决策,因此可能产生诊断和决策差错即意图错误。这种差错情形可以定义为知识型错误。

通过上述分析,就得到了 3 种行为模式中所可能出现的人为差错类型,具体如表 2 所示。

表 2 SRK 模型下人为差错的分类

行为模式	人为差错类型
技能型	技能型疏忽
	技能型遗忘
规则型	规则型疏忽
	规则型错误
知识型	知识型错误

3 情景环境与人为差错的关联分析方法

经过前面的分析,已经得到了情景环境的规范化描述模板和人为差错的分类。为了客观描述情景环境与人为差错的对应关系,一方面需要对工业工程中人为差错数据进行收集和整理;另一方面需要构建合理的关联分析方法。

3.1 人为差错数据收集和整理

通常来说,各个行业经过长期的工程实践,都会积累一定数量的人为差错数据,如人为差错报表、人因事件事故报告等。这些人为差错数据都会包含人为差错类型及其导致原因的相关信息。考虑到数据形式可能不统一,为了便于对人为差错数据进行收集和整理,对人为差错数据的形式进行一定的规范是必要的。

由于本文的目的是分析情景环境与人为差错的对应关系,因此根据前面已经提出的情景环境和人为差错的描述模板,制定人为差错数据收集和整理的步骤如下:首先,将人为差错数据按照时间段进行分组,如:以年度为单位分组;然后,将各时间段内的人为差错按照表 2 的分类法进行分类,并统计出其数量;最后,以表 1 为模板,找出与人为差错所对应的行为形成因子因素,并分别统计其数量。经过上述步骤,规范的人为差错数据应该具有如表 3 所示的形式。

需要说明的是,由于同一种人为差错类型可能是由多种差错成因导致的,因此对于表 3 中的某种人为差错类型来说,其差错数量并不一定等于导致该差错的行为形成因子的数量之和。

表 3 人为差错数据的规范形式

时间段	人为差错类型	差错数量	导致人为差错的行为形成因子及数量			
			行为形成因子 1	行为形成因子 2	...	行为形成因子 n
XXXX 年度	技能型疏忽数量				...	
	技能型遗忘数量				...	
	规则型疏忽数量				...	
	规则型错误数量				...	
	知识型错误数量				...	
XXXX 年度

3.2 情景环境与人为差错的对应关系分析方法

目前,可用于分析两个变量之间对应关系方法主要包括:相关系数法、对应分析方法和灰色关联分析方法。考虑到相关系数法一般需要较多的数据,而对应分析方法对因果关系的描述能力欠佳,本文采用灰色关联分析方法分析情景环境与人为差错之间的对应关系。

灰色关联分析方法是由邓聚龙教授于 1982 年提出的,其基本思想是根据各因素的发展趋势,来判断它们之间的关联程度^[16]。该方法认为各因素的时间变化趋势越接近,它们之间的关联程度就越大。由于这种方法对样本量的大小没有太高的要求,分析时也不需要运用典型的分布规律,而且分析的结果一般与定性分析相吻合,因而具有广泛的适用性。

灰色关联分析方法的基本步骤为:(1) 确定参考序列和比较序列,并对其进行无量纲化处理;(2) 求比较序列与参考序列的关联系数;(3) 计算关联度。

假设无量纲化处理后的参考序列为 $x_0(k)$ ($k=1, 2, \dots, m$), 比较序列为 $x_i(k)$ ($i=1, 2, \dots, n$), 则比较序列和参考序列的关联系数为

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (1)$$

式中, ρ 为分辨系数, $\rho \in (0, 1)$ 。

比较序列与参考序列之间的关联度为

$$\gamma_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi_i(k) \quad (2)$$

根据关联度的大小,就可以得到各比较序列所对应的因素与参考序列所对应因素的关联程度排序,从而可以揭示它们之间的对应关系。需要说明的是,灰色关联度是相对于参考序列的相对关联度,只有针对该参考序列时,才有意义。另外,灰色关联分析方法是只适合于灰色系统。也就是说,只有当各元素之间确实存在关联只是关联关系不明确的时候,才能使用灰色关联分析方法。

对于情景环境与人为差错来说,需要分析“结果-成因”和“成因-结果”两个方向的对应关系。通过分析可以

发现,使用灰色关联分析方法来分析这两种对应关系,其差别只是在于参考序列和比较序列的不同。对于特定人为差错类型与各行为形成因子之间的关联分析,需要将人为差错类型数据作为参考序列,而将行为形成因子数据作为比较序列;对于特定行为形成因子与各人为差错类型的关联分析,需要将行为形成因子数据作为参考序列,而将人为差错数据作为比较序列。因此,灰色关联分析方法可以适用于分析情景环境与人为差错两个方向上的对应关系。

在获得了人为差错数据之后,情景环境与人为差错对应关系分析只需从两个方向运用灰色关联分析方法即可。需要特别注意的是,在分析的过程中,必须确定人为差错类型与行为形成因子元素确实存在关联之后,才可进行后续分析。否则,将有可能出现分析结果不合理的情况。比如,“知识”与“技能型疏忽”在理论上不存在关联,但如果在分析“技能型疏忽”与行为形成因子之间关联时将“知识”作为影响因素之一,通过灰色关联分析方法,仍然可以得到“技能型疏忽”与“知识”的关联度,而这样的结果是不合理的。

4 示例分析

空中交通管制是航空保障的重要组成部分,空中交通管制人员的人为差错对航空安全具有十分重要的影响。本文以空中交通管制为例,运用所提出的方法,分析情景环境与空中交通管制人员人为差错之间的对应关系。

对 2007—2009 年某地区空中交通管制人员的人为差错数据进行收集整理,并按照表 3 提供的形式对人为差错数据进行规范,得到空中交通管制人员的人为差错数据如表 4 所示。

首先,将人为差错类型的数据作为参考序列,运用灰色关联分析方法分析特定人为差错类型与各行为形成因子之间的对应关系。通过计算得关联度如表 5 所示。

然后,将行为形成因子的数据作为参考序列,运用灰色关联分析方法分析特定行为形成因子与各人为差错类型之间的对应关系。通过计算得关联度如表 6 所示。

表 4 2007—2009 年某地区空中交通管制人员的人为差错数据

时间段	人为差错类型	差错数量	导致人为差错的行为形成因子及数量							
			精力	态度	知识	经验	显示仪表的布局	可用任务时间	任务的数量	规程
2007	技能型疏忽	32	12	3	—	11	4	8	5	—
	技能型遗忘	20	8	3	—	5	2	11	2	—
	规则型疏忽	55	19	4	—	17	3	13	4	23
	规则型错误	44	5	3	18	6	6	7	5	19
	知识型错误	9	3	1	9	4	1	2	1	—
2008	技能型疏忽	23	10	5	—	8	3	4	9	—
	技能型遗忘	19	7	1	—	3	3	9	3	—
	规则型疏忽	48	18	6	—	13	1	11	6	19
	规则型错误	50	7	3	21	9	3	3	2	22
	知识型错误	7	1	1	5	1	0	2	3	—
2009	技能型疏忽	27	11	2	—	6	5	7	4	—
	技能型遗忘	16	9	2	—	2	1	7	2	—
	规则型疏忽	39	17	5	—	9	2	9	5	17
	规则型错误	45	8	2	20	3	5	6	3	18
	知识型错误	10	2	0	9	0	0	3	1	—

表 5 特定人为差错类型与各行为形成因子之间的关联度

人为差错类型	行为形成因子							
	精力	态度	知识	经验	显示仪表的布局	可用任务时间	任务的数量	规程
技能型疏忽	0.861 0	0.628 0	—	0.831 1	0.784 4	0.840 7	0.700 1	—
技能型遗忘	0.724 4	0.634 8	—	0.585 5	0.574 4	0.742 6	0.609 0	—
规则型疏忽	0.758 6	0.491 2	—	0.733 9	0.700 0	0.946 0	0.491 2	0.907 9
规则型错误	0.600 1	0.695 2	0.888 1	0.579 5	0.622 1	0.626 1	0.542 3	0.906 5
知识型错误	0.711 1	0.686 7	0.862 5	0.615 1	0.580 1	0.779 0	0.679 7	—

表 6 特定行为形成因子与各人为差错类型之间的关联度

行为形成因子	人为差错类型				
	技能型疏忽	技能型遗忘	规则型疏忽	规则型错误	知识型错误
精力	0.812 6	0.822 1	0.845 5	0.493 7	0.524 8
态度	0.693 4	0.661 4	0.613 3	0.802 1	0.650 2
知识	—	—	—	0.752 7	0.655 9
经验	0.842 8	0.767 8	0.897 0	0.692 2	0.512 7
显示仪表布局	0.702 4	0.573 5	0.726 5	0.884 6	0.520 1
可用任务时间	0.714 4	0.734 6	0.756 6	0.703 8	0.519 7
任务的数量	0.787 6	0.861 5	0.775 3	0.641 9	0.668 1
规程	—	—	0.608 7	0.578 7	—

分别对表 5 和表 6 中的每行数据按照关联度大小排序,就可以得到空中交通管制情景环境与人员人为差错的对应关系,从而可以揭示该地区空中交通管制人员人为差错的规律性,为人为差错的预测和预防提供有效指导。比如:对于规则型疏忽来说,与该种人为差错类型相关的行为形成因子因素按照关联度从大到小排序之后,依次为:可用任务时间、规程、精力、经验、显示仪表的布局、态度和任务的数量。因此,在制定人为差错规避措施对规则型疏忽进行预防时,应该重点关注可用任务时间、规程、精力等因素;对于可用任务时间来说,其可能诱发的人为差错类型按照关联度从大到小排序之后,依次为:规则型疏忽、技能型遗忘、技能型疏忽、规则型错误、知识型错误,因此当情景环境

中可用任务时间比较少时,应该重点关注规则型疏忽、技能型遗忘、技能型疏忽等人为差错类型所可能造成的后果。

5 结 论

本文研究了情景环境与人为差错之间的对应关系,提出了一种可用于分析两者之间关系的分析方法。该方法具有以下特点:(1) 将情景环境分为操作者、机器、任务、环境、组织和辅助系统 6 个方面,通过细化分析得到了情景环境的规范化描述模板,有利于对情景环境进行全面、准确的描述;(2) 根据人的行为特点,将人为差错分为技能型疏忽、技能型遗忘、规则型疏忽、规则型错误以及知识型错误等 5 种基本类型,体现了不同人为差错类型之间的差异性;(3) 使用灰色关联分析方法,通过设定参考序列和比较序列,可以对“结果-原因”和“原因-结果”两种对应关系进行分析。

运用本文提出的方法可以得到,与特定人为差错类型相关的各种行为形成因子的重要性排序,以及特定行为形成因子所可能诱发的各种人为差错类型的可能性排序。分析结果可以反映人为差错发生的规律性,对于人为差错的预防以及制定有针对性的人为差错规避措施都具有重要的参考价值。需要指出的是,本文所研究的仍然是情景环境与人为差错的定性对应关系,为了更深刻地揭示两者之间的关系,还需要结合人为差错概率量化等相关理论和方法,

进行情景环境与人为差错的定量对应关系分析。另外,本文在分析“原因-结果”的关系时,只分析了与单个行为形成因子相关的人为差错类型,而没有考虑多个行为形成因子共同作用的情况,这也将是下一步研究工作的重点。

参考文献:

- [1] Cepin M. DEPEND-HRA: A method for consideration of dependency in human reliability analysis[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2008, 93(10): 1452 - 1460.
- [2] 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.
- [3] Verbano C, Turra F. A human factors and reliability approach to clinical risk management: evidence from Italian cases[J]. *Safety Science*, 2010, 48(5): 625 - 639.
- [4] Hollnagel E. *Cognitive reliability and error analysis method (CREAM)*[M]. London: Elsevier Science Ltd, 1998.
- [5] 沈祖培, 王遥, 高佳. 人因失误的后果-前因追溯表[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(6): 799 - 802. (Shen Z P, Wang Y, Gao J. Consequent-antecedent retrospective table for human errors[J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2005, 45(6): 799 - 802.)
- [6] 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.
- [7] Deere S J, Galea E R, Lawrence P J. A systematic methodology to assess the impact of human factors in ship design[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2009, 33(2): 867 - 883.
- [8] 罗晓利, 李海燕. 基于灰色关联理论的空管人误分类分析[J]. 中国民航大学学报, 2009, 27(4): 26 - 29. (Luo X L, Li H Y. Analysis and classification of human errors in ATM based on grey relativity theory[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2009, 27(4): 26 - 29.)
- [9] 李蒙, 袁策凤. 核电站人因失误的动态灰色关联分析[J]. 核动力工程, 2010, 31(3): 74 - 77. (Li M, Yuan C F. Dynamic grey correlation analysis of human error in nuclear power plants[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2010, 31(3): 74 - 77.)
- [10] Chang Y H, Wang Y C. Significant human risk factors in aircraft maintenance technicians[J]. *Safety Science*, 2010, 48(1): 54 - 62.
- [11] 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.
- [12] Kim J W, Jung W D. A taxonomy of performance influence factors for human reliability analysis of emergency tasks[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2003, 16(1): 479 - 495.
- [13] 孙志强, 史秀建, 刘凤强, 等. 人为差错成因分析方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(6): 21 - 27. (Sun Z Q, Shi X J, Liu F Q, et al. Study on causation analysis method for human errors[J]. *China Safety Science Journal*, 2008, 18(6): 21 - 27.)
- [14] Rasmussen J. Skills, rules, and knowledge; signals, signs and symbols, and other distinctions in human performance models[J]. *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics*, 1983, 13(3): 257 - 266.
- [15] Reason J T. *Human error*[M]. Cambridge, U. K.: Cambridge University Press, 1990.
- [16] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1985. (Deng J L. *The basic method of grey system*[M]. Wuhan: Press of Huazhong College of Technology, 1985.)