

任务需求及资源的人因可靠性分析方法研究

陈娟¹, 吴泽坤²

(1. 集美大学理学院, 福建 厦门 361021; 2. 北京航空航天大学可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

[摘要] 将广泛应用于人力资源管理的职业压力模型引入到人因可靠性分析(human reliability analysis, HRA)之中。基于这一模型,提出了可应用于HRA的任务需求及资源方法。在这一方法中,建立了任务情景中影响因素和人为心理因素之间的定性关系。基于这一关系,进一步提出了描述不同压力水平下操作人员动机强度和人为差错概率(human error probability, HEP)关系的概率模型。通过相关实验,这一模型的有效性得到了充分的验证。

[关键词] 人因可靠性分析;任务需求及资源;职业压力模型;人为差错概率

[中图分类号] O 29

Research on Human Reliability Analysis with Task Demands and Task Resources

CHEN Juan¹, WU Zekun²

(1. School of Science, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. School of Reliability and System Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: This study focused on making developments in the analysis of human error with introducing the occupational stress models into human reliability analysis (HRA). With the reference to the models in occupational stress studies, we put forward the task demands and resources method, which describes the qualitative relationship between the influencing factors in the task context and the psychological processes of the operator. Based on this relationship, a probabilistic model for determining the human error probability (HEP) with motivational intensity under different stress levels has been developed. A human reliability experiment has been conducted and the experiment results illustrated the effectiveness of this model.

Keywords: human reliability analysis(HRA); task demands-resources; occupational stress model; human error probability(HEP)

0 引言

由于不同工业领域中系统规模的不断扩大,系统复杂程度在不断提升,人-机交互也愈发频繁。因此,近几年来由人为因素所引起的事故逐渐增多。统计显示,目前为止,超过60%的工业事故源于人为差错^[1]。在核电、航空、航运、铁路、医疗等高危领域,人为事故会造成灾难性的后果。针对工业领域中的人为差错,研究人员展开了一系列定性和定量的研究,系统性的人因可靠性分析

[收稿日期] 2018-03-25

[修回日期] 2018-06-06

[基金项目] 福建省自然科学基金项目(2018J05089)

[作者简介] 陈娟(1961—),女,副教授,从事应用数学研究。

(human reliability analysis, HRA) 方法也随之被不断提出^[2-4]。本文参考职业压力模型, 对任务情景中的影响因素和操作人员的心理过程展开逐步分析, 从任务需求和任务资源两种分类下的因素对动机和压力这两个重要心理因素进行定性分析, 并借鉴可靠性分析中所常用的威布尔分布模型^[5], 构建了以动机强度和压力水平作为自变量的概率模型, 对人因差错进行量化。

1 任务需求及资源方法

1.1 职业压力模型

职业压力指在工作所处的大型系统环境中不同因素相互交互而产生的压力^[6-7]。这些因素被称为“心理压力源”, 它们包括过度的时间压力、不佳的晋升前景、匮乏的工作支持等等。

职业压力模型旨在针对这些压力源对雇员的生理和心理所产生的影响展开分析, 有 2 个重要特点: 第一, 职业压力模型可以分析工作环境中引起工作者压力的主要因素, 即心理压力源; 第二, 职业压力模型发展出了可以从生理和心理两个方面提升人为表现的方法。依据职业压力研究中的相关理论和模型, 可以对现有的 HRA 做出改进和创新。

1.2 任务需求及资源概念模型

如图 1 所示, 任务需求及资源方法主要有 3 个阶段, 即: 行为形成因子 (behavior formation factor, PSFs) 的识别, 心理过程的分析以及人因差错的量化。

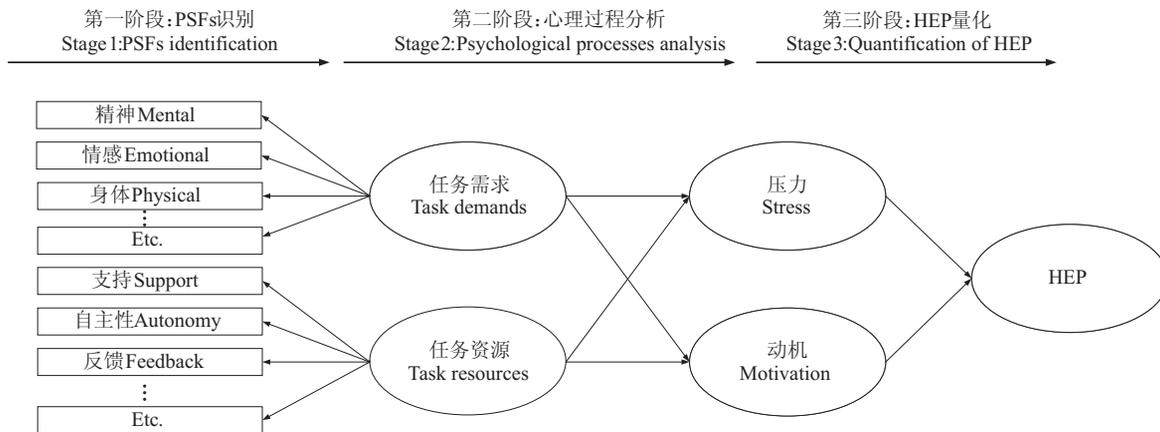


图 1 任务需求及资源人因可靠性方法的 3 个分析阶段

Fig.1 Three analytical processes in the task demands and resources HRA method

1.3 动机、压力及人因差错之间的定量关系

1.3.1 动机、压力和人为表现

动机被认为是人为表现模型的基础并被长期作为组织心理学的研究焦点。本文着重考虑了动机和外部因素对于人为表现的综合作用。同时, 参考以耶克斯-多德森定律为代表的相关研究^[8], 设想在每一次任务过程中操作者的人为表现都对有一个确定的最佳动机水平。

1985 年, Jamal^[9] 的研究支持了压力和人为表现之间所存在的倒 ‘U’ 型曲线关系, 即适度的压力水平对于人为表现是最佳的。Wallgren 等^[10] 的研究则表明, 动机在工作者所感知的压力水平和对于工作的控制程度之间起到了中介作用, 并且动机强度和压力水平呈现出负相关的关系。因此, 在任务需求及资源方法中, 动机被视作压力和人为表现之间的中介变量, 压力水平和动机强度之间存在负相关的关系, 如图 2 所示。

1.3.2 人因差错的量化

在 HRA 研究中, 人为表现通常以人因差错进行量化。依据节 1.3.1 中对于动机、压力和人为表现之间关系的分析, 人因差错在任务需求及资源方法中的概率分布可由式 (1) 表示:

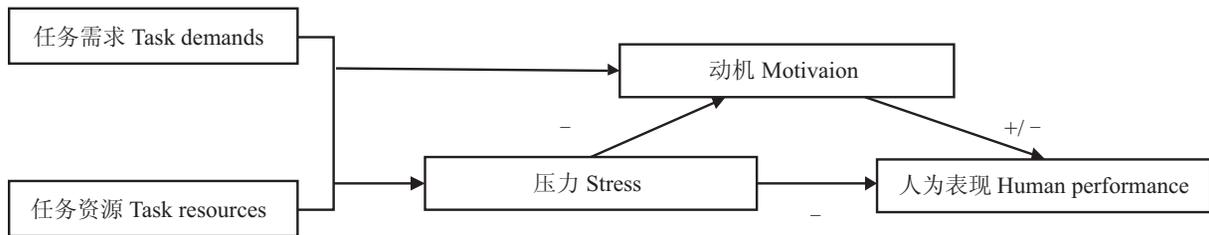


图 2 动机、压力和人为表现之间的关系

Fig.2 Relationship between motivation, stress and human performance

$$HEP = \begin{cases} 1 - k_1 e^{-\alpha \cdot (m_0(s) - m)^\beta}, & m \in [0, m_0(s)], \\ 1 - k_1 e^{-\alpha \cdot (m - m_0(s))^\beta}, & m \in [m_0(s), 1]. \end{cases} \quad (1)$$

其中： m 是作为随机变量的动机强度，取值范围为 $0 \sim 1$ ； $m_0(s)$ 是以压力水平作为自变量的最佳动机函数，其具体计算方法将在下文中展开说明； k_1 是压力系数，表示压力对于人为表现的负面影响程度，其取值为压力水平值的互补数； α, β 是外部影响因素系数，表示任务情景之外的因素对于操作者人为表现的影响程度，其取值随着任务类型而改变。

如图 3 所示，在这一关于人因差错的概率分布中，HEP 随着动机强度的增加呈现先下降后上升的趋势。此外，在最佳动机强度 $m_0(s)$ 下有一个最低 HEP 值。这一关于人因差错的‘U’型概率分布不仅与节 1.3.1 中动机和人为表现的关系相一致，而且揭示出了操作者行为背后复杂的心理过程。

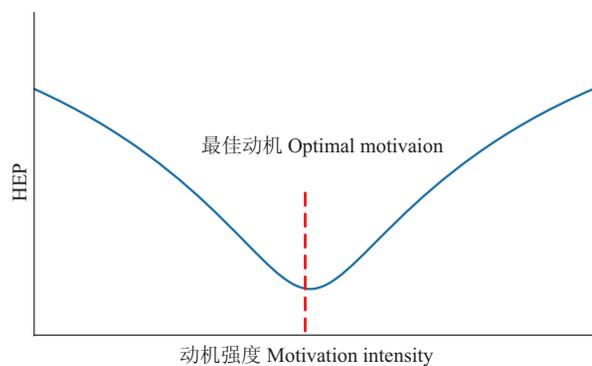


图 3 任务需求及资源方法中 HEP 的变化趋势

Fig.3 Trend of HEP development in the task demands and resources method

确定 HEP 的最后一个步骤是对压力在动机所产生的影响进行量化。依据 Parker 等^[11]所做出的研究，高度压力水平下操作人员的动机会大幅下降，将压力水平和最佳动机建立线性回归模型，对这两个变量之间的负相关关系做出直观的解释，如式 (2) 所示：

$$m_0(s) = 1 - k_2 s. \quad (2)$$

其中： s 是压力水平数值； k_2 是相关系数。

2 实验研究

2.1 实验设计

为了验证任务需求及资源方法的适用性，进行了基于此方法的人因可靠性实验研究。实验旨在收集任务需求及资源方法所需的人因可靠性数据。

实验仪器是一个基于单片机的模拟装置，由 1 组 PAPI 灯、1 个 LCD 显示屏、1 个输入面板、1 个信息处理系统和多个控制器组成。在实验中，针对显示屏所给出的具体信息，实验对象需要结合 PAPI 灯的显示做出相应的操作。通过在输入面板中输入指令，实验对象的操作可以得到确认和评估，同时，实验仪器可以记录下实验对象的表现和行为。

共有 60 名 (36 位男性和 24 位女性) 身体健康的实验对象参与了本次实验。所有实验对象会被随机分配到具有不同实验条件的 5 个实验小组中，每个实验小组中的实验条件分别对应着不同的任务需求和任务资源。

2.2 实验中的任务需求及资源

2.2.1 任务需求和任务资源

任务需求及资源方法中的第一个阶段是对 PSFs 的识别和分类。在目前的 HRA 研究中, 对于 PSFs 的选取并无共识。作为对于人因差错分析的一种探索, 实验中, 对 PSFs 和现有的 HRA 方法 (CREAM、SPAR-H) 进行分析比较^[12-13], 认为应该强调诸如表现反馈和经济报酬这样的影响因素, 最终选取了和实验模拟任务紧密相关的 8 个 PSFs, 并将其分为任务需求 (任务复杂度、时间压力、不利的时间安排、不利的任务条件) 和任务资源 (经济报酬、表现反馈、支持、训练) 2 类, 如表 1 所示。

表 1 CREAM、SPAR-H 和实验中的 PSFs 选取
Tab.1 Selection of PSFs in the CREAM, SPAR-H, and the experiment

CREAM	SPAR-H	实验中的 8 个 PSFs 8 PSFs in the experiment
培训和经验的充分性 The sufficiency of training and experience	经验/训练 Experience/train	训练 Train
规程/计划的可用性 Regulations/availability of plan	规程 Regulations	不利的任务条件 Adverse task conditions
可用时间 Available time	可用时间 Available time	时间压力 Time pressure
同时出线的目标数量 The number of targets at the same time	任务复杂度 Complexity of task	任务复杂度 Complexity of task
班组人员的合作质量 The quality of team members' cooperation	工作步骤 Work steps	支持 Support
值班时间 Duty time	职责 Duty	不利的 Disadvantageous time arrangement
工作条件 Working conditions	压力 Pressure	表现反馈 Performance feedback
人机界面与运行支持的完善性 The perfection of human-machine interface and operation support	人机交互 Human-computer interaction	经济报酬 Economic reward
组织的完善性 The perfection of organization		

2.2.2 压力水平

在实验中, 5 个不同实验小组的实验条件可以根据专家评估进行具体量化。每个小组所对应的压力水平可由这一量化结果做出估计, 如式 (3) 所示。

$$s = [\sum TD / \max(\sum TD) - \sum TS / \max(\sum TS)] / 2 + 1/2, \tag{3}$$

其中: s 是基于 PSFs 对于操作者影响的估计压力水平数值, 取值范围在 0 ~ 1; $\sum TD$ 为任务需求中产生显著压力影响的 PSFs 个数; $\sum TS$ 为任务资源中产生显著压力影响的 PSFs 个数, 它们是对应于任务需求和任务资源的 PSFs 所引起的压力的数量值; $\max(\sum TD)$ 和 $\max(\sum TS)$ 分别是 $\sum TD$ 和 $\sum TS$ 的最大数值。

根据表 2 中第 1 号实验小组的评测结果可知: 任务需求中产生显著压力影响的 PSFs 个数为 4, 则有 $\sum TD = 4$, 同理可以得到 $\sum TS = 2$ 。PSFs 总的个数为 $\max(\sum TD) = 4$, 同理可知 $\max(\sum TS) = 4$ 。由式 (3) 可以推得 1 号实验小组中实验对象所承受的压力水平 $s = [4/4 - 2/4] / 2 + 1/2 = 0.75$, $k_1 = 1 - s = 0.25$ 。同理可以求得所有实验小组压力水平, 总体结果如表 3 所示。

表 2 第 1 号实验小组中 PSFs 产生压力数值的评估结果
Tab.2 Evaluation results of the stress level with PSFs in the group 1

PSFs	实验条件 Experimental condition	压力影响 Pressure influence
任务复杂度 Complexity of task	实验对象被要求尽快准确地完成任务,即同时面对两个任务目标 The subjects were asked to complete the task as soon as possible,facing two tasks at the same time	显著 Significant
时间压力 Time pressure	任务允许时间被设置为 6 s,相较于平均任务时间 9 s,实验对象承受着较高的时间压力 The task completion time is set to be 6 s.Comparing to the average needed time 9 s,the subjects are subjected to high time pressure	显著 Significant
不利的时间安排 Disadvantageous time arrangement	实验时间从 10:30 p. m 至 11:00 p. m, 因此这一时间不利于实验对象的昼夜节律 The 10:30 p. m. to 11:00 p. m. task time does not synchronize with the subjects' circadian rhyme	显著 Significant
不利的任务条件 Adverse task conditions	实验对象需要在昏暗的灯光下完成整个任务 The subject need to complete the task in dim light	显著 Significant
经济报酬 Economic reward	实验对象在实验结束后将得到现金形式的经济报酬 At the end of the experiment,the subjects will receive financial reward in cash form	显著 Significant
表现反馈 Performance feedback	实验对象在实验中会得到其任务的反馈 The subject will receive feedback about the tasks during the experiment	显著 Significant
支持 Support	实验对象需要独立完成任务,在整个实验过程中不会得到任何支持 The subjects need to complete the tasks independently,without any assistance in the whole process	不显著 Not significant
训练 Train	除了关于实验的基本介绍,实验对象并未接受任何与任务相关的训练 There no task related training provided to the subjects except for the basic introduction about the experiment	不显著 Not significant

表 3 5 个实验小组的压力水平数值和压力系数
Tab.2 Stress levels and stress coefficients for five experiments

实验小组 Experiment group	1	2	3	4	5
s	0.75	0.5	0.375	0.25	0
k_1	0.25	0.5	0.625	0.75	1

2.2.3 动机强度

相对于压力水平,动机强度更易随着不同的个体而产生差异。因此,仅仅采用专家评估难以对个体动机强度之间的差异进行充分分析。针对本次实验,引入了心理量表对所有实验对象的动机强度进行测量。在实验开始之前,所有实验对象都需要填写由情景动机量表改编的调查问卷。问卷通过不同的回答选项从 4 个不同的维度对动机展开了度量。

2.2.4 实验任务中的人为表现

对于人因差错的量化是所有 HRA 方法中关键的步骤之一。实验中实验对象的人因差错被定义为未能在给定的时间内完成所要求的任务。实验条件之一的时间压力恰好提供了与这一定义相一致的任务成功判据。这一判据是实验对象完成任务的可用时间。若实验对象未能在可用时间内完成任务,则认为任务失败。根据这一判据,HEP 可以通过实验中实验对象的失败次数相对于总的任务操作次数的比例来计算。当实验对象完成 50 次操作之后,HEP 可以通过式 (4) 计算。

$$HEP = N_0/N, T_i > T_a, \tag{4}$$

其中: T_i 是实验对象完成第*i*次任务所用的时间; T_a 是完成任务的可用时间; N_0 是实验对象任务失败的次数; N 是任务重复的总次数,实验中被设定为 50 次。

2.3 实验结果

在图 4 中通过散点图对实验中不同实验小组的人为表现结果进行了直观展示。图 4 中, x 轴和 y 轴分别表示动机强度和 HEP,每个数据点代表着一个实验对象,不同的实验小组则处于不同的压力

水平下。由图4可以看出, 1号实验小组中实验对象都处于最高压力水平之下 ($s = 0.75$), 而这一组所对应的 HEP 也是相对最高的; 相比之下, 5号实验小组的实验对象所承受的压力水平最低 ($s = 0.125$), 并且这一组的 HEP 也是5个实验小组中最低的。直观上, HEP 随着不同任务需求和任务资源下不同的压力水平的上升而上升。对不同实验小组之间的 HEP 差异进一步进行了以压力水平作为单因素的方差分析, 结果显示, 压力水平对于 HEP 具有显著的影响 ($P < 0.05$)。

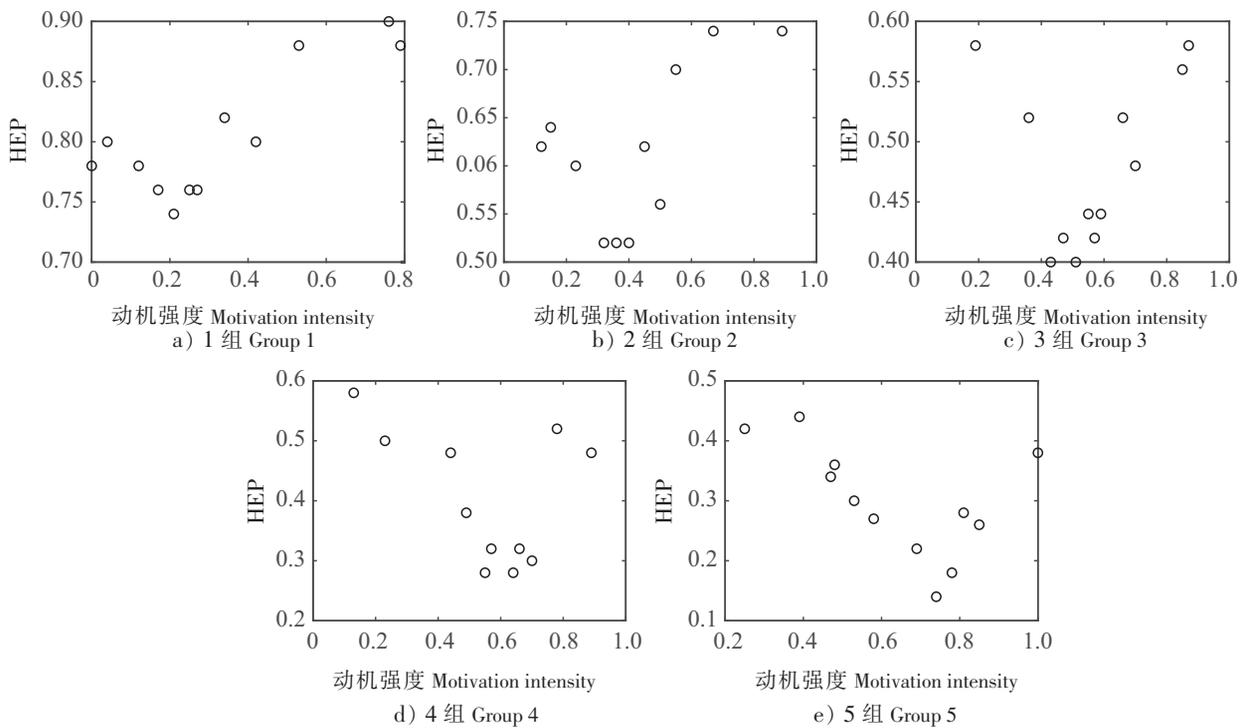


图4 实验结果

Fig.4 Experiment results

每一个实验小组的 HEP 曲线由节 1.3.2 中的任务需求及资源模型推导而出。对于 1 号实验小组, 根据其所对应的压力水平 ($s = 0.750$) 得到压力系数 ($k_1 = 0.250$), 进而按照式 (1) 中的数学模型对实验数据进行拟合, 可以得出外部影响因素系数 α 和 β ($\alpha = 1.587, \beta = 1.098$), 见表 4。由于实验中不同小组的任务是相同的, 其余 4 组的这两个系数也保持一致。如图 5 所示, 5 个实验小组的拟合结果呈现出人因差错伴随着动机强度而产生的 ‘U’ 型趋势。HEP 的最小值可以在最佳动机强度取得。为了验证动机在压力和人为表现之间所起到的中介作用, 对于实验中的最佳动机强度和压力水平进行了线性回归分析, 如图 6 所示, 依据回归模型 $m_0 = 1 - k_2 s$ 最佳动机强度和压力水平之间呈现出线性关系: $m_0 = 1 - 1.204 s$ ($R^2 = 0.7409$)。

表4 不同实验小组的压力水平和相应系数

Tab.4 Stress levels and relative coefficients for all the groups

实验小组 Experiment group	s	k_1	α	β	m_0	调整后的 R^2 $R^2_{adjusted}$
1	0.750	0.250	1.587	1.098	0.1905	0.8814
2	0.500	0.500	1.587	1.098	0.2033	0.7817
3	0.375	0.625	1.587	1.098	0.5189	0.7512
4	0.250	0.750	1.587	1.098	0.5748	0.7146
5	0.125	0.875	1.587	1.098	0.7069	0.6850

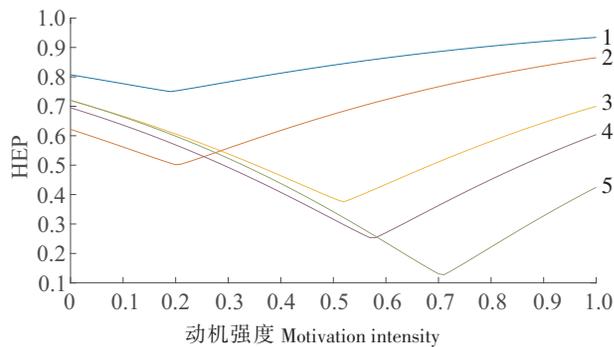


图 5 不同实验小组中 HEP 的变化趋势

Fig.5 Trends of HEP developments in different experiment groups

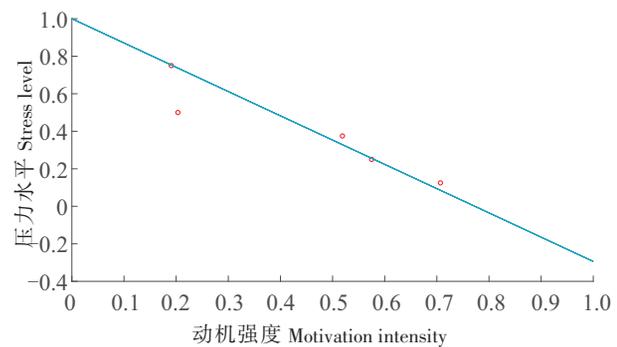


图 6 最佳动机强度和压力水平的关系

Fig.6 Relationship between optimal motivation intensity and stress level

3 结论

本文提出了任务需求及资源人因可靠性分析方法。通过参考人力资源管理中的职业压力模型,将任务需求及资源方法聚焦于操作者在某个具体任务中的心理过程,并提出了分析人因差错的 3 个基本阶段。为了验证任务需求及资源方法的有效性和适用性,开展了在给定任务需求和任务资源下的人因可靠性实验,实验结果支持了任务需求及资源方法中的定性和定量关系,并展示出了该方法在实际应用中的前景。

[参 考 文 献]

- [1] GRIFFITH C D, MAHADEVAN S. Inclusion of fatigue effects in human reliability analysis [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96(11): 1437-1447. DOI:10.1016/j.res.2011.06.005.
- [2] 黄曙东, 张力. 人因失误根原因分析方法与应用 [J]. 人类工效学, 2003, 9(1): 31-34.
- [3] 张力. 人因失误心理背景与核电站安全 [J]. 核动力工程, 1992, 13(5): 27-30.
- [4] 周忠宝, 周经伦, 孙权. 考虑人因的面向对象贝叶斯网络概率安全评估模型 [J]. 核动力工程, 2007, 28(3): 107-112.
- [5] 肖国清, 陈宝智. 人因失误的机理及其可靠性研究 [J]. 中国安全科学学报, 2001, 11(1): 22-26.
- [6] YANG L Q, CHE H, SPECTOR P E. Job stress and well-being: an examination from the view of person-environment fit [J]. Journal of Occupational & Organizational Psychology, 2008, 81(3): 567-587. DOI:10.1348/09631790x243324.
- [7] DEMEROUTI E. The job demands: resource model of burnout [J]. Journal of Applied Psychology, 2001, 86(3): 499-512. DOI:10.1037/0021-9010.86.3.499.
- [8] 姜磊. 工作应激与工作绩效倒 U 模型的研究解析 [J]. 商场现代化, 2011, 13: 101-102.
- [9] JAMAL M. Relationship of job stress to job performance: a study of managers and blue-collar workers [J]. Human Relations, 1985, 38(5): 409-424. DOI:10.1177/001872678503800502.
- [10] WALLGREN L G, HANSE J J. Job characteristics, motivators and stress among information technology consultants: a structural equation modeling approach [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2007, 37(1): 51-59. DOI: 10.1016/j.ergon.2006.10.005.
- [11] PARKER S L, JIMMIESON N L, AMIOT C E. The motivational mechanisms underlying active and high-strain work: consequences for mastery and performance [J]. Work & Stress, 2017, 31(3): 233-255. DOI:10.10801026783.2017.1303551.
- [12] 王遥, 沈祖培. CREAM: 第二代人因可靠性分析方法 [J]. 工业工程与管理, 2005, 10(3): 17-21.
- [13] 何旭洪, 童节娟, 黄祥瑞. 低功率和停堆工况下人员可靠性分析 [J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(4): 93-96.

(责任编辑 马建华 英文审校 黄振坤)