

Methods on the Research of Operator Reliability

Xiang Fang, Yangping Zhou, Fu Li

Institute of Nuclear and New Energy Technology of Tsinghua University, Beijing
Email: fxdirection@sina.com

Received: Aug. 23rd, 2013; revised: Sep. 20th, 2013; accepted: Sep. 26th, 2013

Copyright © 2013 Xiang Fang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The paper, utilizing nuclear power plant as a research platform, summarizes the multiple relevant research methods on reliability to Chinese nuclear power plant operators over the past 10 years. The paper analyzes the necessity and feasibility of studying the nuclear power plant operators in China from various angles like human cognition reliability model, fuzzy synthetic evaluation math model, and psychology quality research model etc. The summary of these research methods is not only a record of the past years' research about operators' reliability but also a discussion about the research methods themselves. These methods of the nuclear power plant operators' reliability research will be not only useful to the safe operation of nuclear power plant but also will be used as reference for the operators of other industries.

Keywords: Nuclear Power Plant Operator; HCR Model; Borda; Possibilistic Fuzzy Regression Model; Psychology Quality; Activity Evaluation; Fuzzy Synthetic Evaluation; Psychology Evaluation

操纵员可靠性研究的相关多种方法

方 向, 周杨平, 李 富

清华大学核能与新能源技术研究院, 北京
Email: fxdirection@sina.com

收稿日期: 2013年8月23日; 修回日期: 2013年9月20日; 录用日期: 2013年9月26日

摘 要: 本文采用核电厂模拟器作为研究平台, 对过去十几年来中国核电厂操纵员的可靠性研究采用的多种相关方法进行了回顾总结, 说明了从人的认知可靠性模型、模糊综合评价数学模型、心理素质研究模型等多种角度对中国核电厂操纵员研究的必要性和可行性。这些研究方法的总结, 既是对核电厂相关人的可靠性研究的真实记录回顾, 也是对其中研究方法的再次探讨。对核电厂操纵员进行可靠性研究的多种方法不仅可以对核电厂的安全运行起到有益作用, 而且可为其他行业操纵员可靠性研究提供参考。

关键词: 核电厂操纵员; 人的认知可靠性模型; Borda 数; 可信性模糊回归模型; 心理素质; 行为评价; 模糊综合评价; 心理评价

1. 引言

在核电厂发生的重大事件和事故中, 人因原因引起的已占到一半以上。现在世界上许多国家都越来越重视操纵员的可靠性研究。

核电厂操纵员作为保证核电厂安全的最重要因

素已越来越受到重视。对核电厂操纵员可靠性的研究方法也是多种多样。本文针对中国核电厂操纵员在过去十几年间的多种可靠性研究方法进行了简要回顾与总结, 这些方法的综合应用不仅对核电厂的安全运行是十分重要, 而且可以为其他行业操纵员可靠性研究提供参考。

2. 核电厂操纵员进行可靠性研究的多相关模型及方法

中国核电厂操纵员的可靠性研究主要经历包括了认知可靠性模型研究、操纵员综合评价、操纵员心理素质评价系统研究等几个阶段和多个不同方面。如图 1 所示。

其中操纵员的基本素质包括学历、工作年限、工作职务、有无执照等基本内容；操纵员岗位能力包括岗位相关知识能力、事故响应能力、协作能力和沟通能力等内容；操纵员心理素质评价考虑了操纵员作为核电厂最重要安全因素的评价内容。下面简单介绍其研究的模型方法与主要成果。

2.1. 核电厂操纵员认知可靠性模型研究

对核电厂操纵员的可靠性研究主要是在核电厂模拟器上对操纵员在有时间约束条件下的事件响应的定量研究。象美国、匈牙利、日本与台湾等多个国

家地区都是利用人的认知可靠性模型 HCR (Human Cognitive Reliability)来进行研究^[1]。

人的认知可靠性模型 HCR 是定量进行人的可靠性分析 HRA (Human Reliability Analysis)模型中最有影响的一种。它是基于把专业操纵员行为详尽分为技能型、规则型和知识型的模型。人的认知可靠性模型首先根据人的认知过程对人的行为进行了分类；其次对三种不同的认知过程类型的不同响应概率用不同的三种时间 - 可靠性曲线加以区分。如图 2 所示^[2]。

HCR 模型提出了人的行为类型的三种类型假定，即技能型、规则型、知识型。根据核电厂模拟器实验的结果可以得到相应的三条时间-人员不响应概率曲线，其中时间是实际反应时间与完成操作的中值时间 T0.5 之比所得到的归一化时间。这三条曲线可以用威布尔分布(或对数正态分布)来拟合^[3]。

中国核电厂操纵员可靠性研究实验选择了六个事故序列情景，它们是蒸汽发生器 U 形管破裂(SGTR)



Figure 1. Evaluation content of capability of operators
图 1. 操纵员综合能力评价内容

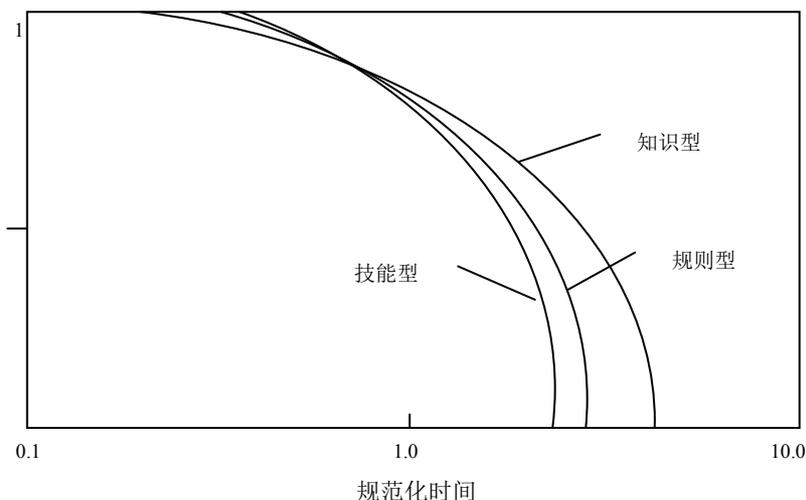


Figure 2. HCR curve of human cognitive reliability
图 2. 人的认知可靠性 HCR 曲线

事故、一回路失水(LOCA)事故、主蒸汽管道断裂(MSLB)事故、甩外负荷(EPNF1, EPNF2)事故和未紧急停堆的预期瞬变(ATWS)事故。

实验对 HI 进行研究。HI 是指核电厂在异常运行条件下, 操纵员对核电厂症状的一种响应。核电厂的症状包括报警信号、运行参数变化。自动动作等, 而操纵员的响应是指操纵员的控制操作、通讯交流、选择规程等。

被试人员是来自中国一核电厂的新、老操纵员, 共计 54 人, 分成四批, 10 个班组。

6 个实验 HI 的操纵员反应中值时间 T0.5, 认知模型尺度参数 η_i , 形状参数 β_i , 分别如表 1 所示。

根据 950 MW 全尺寸模拟器实验获得的参数, 六个实验事故的威布尔分布拟合曲线可以得到, 如图 3 所示。

在图 3 中, 六个实验事故曲线 SGTR(HI1), LOCA(HI2), MSLB(HI3), EPNF1(HI4), ATWS(HI6)与 EPNF2(HI5)从左至右排列。

300 MW 真实核电厂模拟器的实验数据重复了以上结果。

6 个实验事故的结果证明我国核电厂操纵员对的行为类型基本为规则型, 这反映了我国核电厂操纵员的特点; 实验中所求得的响应时中值含有操纵员可靠性的大量信息, 可以用来对操纵员的行为进行分析和鉴定。它可以被监测、可以被量化计算、与操纵员的行为有关而且对于有时间约束的核电厂操纵员可靠性分析来说, 是影响核电厂安全的重要因素, 因此,

可以作为中国核电厂操纵员的行为标识物。

2.2. 可信性模糊回归模型对操纵员事故响应时研究的应用

核电厂操纵员的事事故响应时间, 受到多种行为形成因子(Performance Shape Factor)PSF 的影响, 例如: 应激压力, EOP 规程, 认知程度等等。因此要研究这些 PSF 的综合影响, 可以假设核电厂操纵员的事事故响应时间与 PSF 有关, 能够用数学方程表示。但是由于 PSF 的影响难以定量描述, 所以采用可信性线性模型即可信性分布(模糊分布)模型来描述核电厂操纵员事事故响应时间这个复杂问题。

因为 PSF 如: 操纵员经验、年龄、素质等影响核电厂操纵员的事事故响应时间, 所以根据可信性线性模型的方法可以将核电厂操纵员的事事故响应时间与 PSF 间的线性模糊关系描述为下面公式(1):

$$Y = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + \dots + A_n X_n \quad (1)$$

Table 1. Weibull distribution fitting parameters
表 1. 威布尔分布拟合参数表

HI	η_i	β_i	T0.5 (秒)
SGTR	1.17	2.3	81.89
MSLB	1.23	1.75	28.39
LOCA	1.24	1.7	54.81
EPNF	1.56	0.82	18.55
ATWS	1.4	1.1	57.36

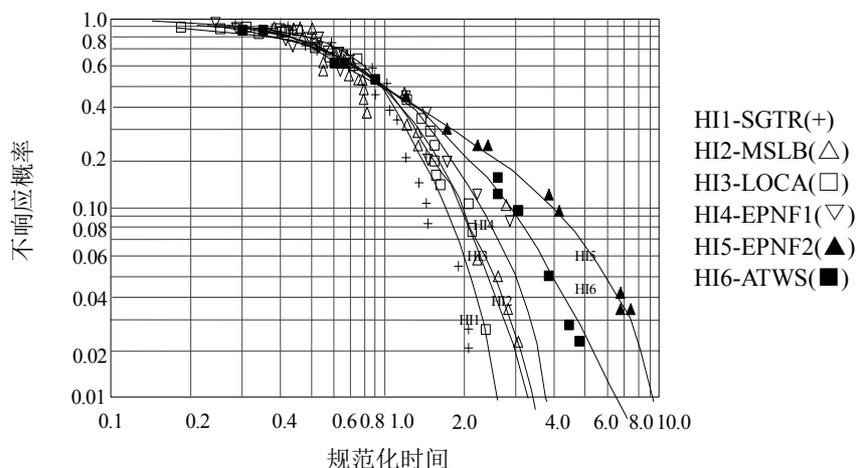


Figure 3. Fitting curve of 2 parameters of Weibull distribution
图 3. 基于两参数威布尔分布的事故拟合曲线

其中 Y 是由模糊数表示的响应时间, 而 X_1, X_2, \dots, X_n 是实数的 PSF, 而 A_0 是模糊数常数, 表示核电厂操纵员事故响应时间参数, A_1, \dots, A_n 是用模糊数表示的对事故响应时间产生影响的 PSF 参数, 例如: 影响操纵员响应时间的因素有应激压力、EOP 规程、认知程度、人机界面设计中的工效学水平、(报警, 安全) 参数显示系统 (SPDS)、操纵员的组成、通讯、培训以及经验等。

可以利用可信性线性模糊回归模型进行有关核电厂操纵员的事故响应时间受到各种因素影响的研究。目前的研究认为操纵员的事故响应时间与操纵员的年龄、控制室内外的工龄、学历等因素有关^[4]。

公式(1)提供了利用可信性线性模糊回归模型研究核电厂操纵员事故响应时间的方法, 明确了绩效形成因子 PSF 对操纵员事故响应时的影响, 该模型可以应用到很多复杂系统的研究中。

根据中国核电厂操纵员的现有数据资料以及模拟机试验结果, 可以利用可信性线性模糊回归方法对核电厂操纵员事故响应时间进行研究。

中国核电厂操纵员具有共性的因素是年龄、控制室内的工作经验、控制室外的工作经验以及文化水平。

对于中国核电厂操纵员响应时 Y_j 的线性模糊回归有下列结果:

$$Y_j = A_0 + A_1 X_{1j} + A_2 X_{2j} + A_3 X_{3j} \quad (2)$$

其中 X_{1j}, X_{2j}, X_{3j} 是指第 j 组操纵员的年龄, 控制室外经验以及受教育的时间, 当 $Y_j = (Y_j, \delta_j)_L$ 按照由第 j 组的输入变量 $X_j = (X_1 \dots X_3)_j Y_j$ 和 A_i 为由模糊数, $i = 0, \dots, 3, A_0$ 表示核电厂操纵员事故响应时间的模糊数参数, A_1, A_2 和 A_3 分别表示操纵员年龄、控制室外经验与所受教育程度的模糊数参数。

在 HRA 的研究中用模糊回归方法去研究操纵员的失效概率, 可以提供在一个在 PSF(年龄, 控制室经验, 文化水平)与操纵员响应时之间很好的拟合关系。尽管由于实验条件之间的差别, 在不同的环境状况下可能有不同的结果。但是, 模糊回归模型会给分析人员提供更接近的失效概率。

具体研究中采用 24 名 8 组操纵员的事故响应时间、年龄、控制室内经验、控制室外经验和文化水平均取各组操纵员的平均值。

通过前面分析的步骤得到操纵员事故响应时的

可信性线性回归方程为:

$$Y = (1417.2, 10)_L + (-121.8, 0)_L X_1 + (82.27, 0)_L X_2 + (95.45, 0)_L X_3 \quad (3)$$

其中 X_1, X_2, X_3 分别代表年龄、控制室外工作经验与文化程度。

从公式(3)可以看到, A_0 为正值, 表明核电厂操纵员的事故响应时间有一基本的模糊数常数, PSF 因子的作用是通过 A_1, A_2 和 A_3 来实现的。操纵员的年龄系数 A_1 是负值, 表明年龄越大, 凭经验进行迅速判断的可能性越大, 对事故响应时间是负的干扰; 操纵员的控制室外的工作经验即工龄与文化程度的系数 A_2 和 A_3 均为正值, 表明工作经验的丰富与接受过较好的教育可以提高操纵员的综合素质与判断能力, 可以避免简单下结论进行判断。

2.3. 核电厂操纵员模糊综合评价研究的 Borda 数法

Borda 数法与 Borda 规则作为模糊综合评价中的重要方法被广泛地应用于选拔性研究、健康领域研究和社会经济学研究等方面。

该方法可以用于定量分析综合评价核电厂操纵员。在该方法中, 对于因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 评价结果可以被不同的等级、评价和数据表述。假设有 m 种评价等级, 相关评价集为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 。由于不同的评价因素具有不同程度, 评价因素 u_i 被付与权重因素 a_i , 并且 $\sum_{i=1}^n a_i = 1$ 。不同的权重分配将导致不同的综合评价结果。权重因素可被表述为 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 。在得到 U, V 和 A 后, 评价集可通过模糊相关转换矩阵 $A^{\circ}(U \times V)$ 获得。

将核电厂操纵员在模拟器上完成的 6 个实验作为综合评价因素集 $B = \{SGTR, LOCA, MSLB, EPNF1, EPNF2, ATWS\}$ 。通过专家给出相应实验权重集 $\sum_{i=1}^n \omega_i(x) = 1$ 。模糊评价结果 $B_i = \sum_{i=1}^n \omega_i(x) B_i(x)$ 。根据评价的结果可以预测核电厂操纵员的综合能力并通过实际进行检验^[5]。

2.4. 核电厂操纵员心理素质评价研究

随着现代心理测量学理论研究的深入及心理测

量在人员选拔上的应用，心理选拔系统在人员测量和评价中起着越来越显著的作用，成为对人的行为进行评价、预测的核心内容之一。

国外对从事危险职业的心理研究相对开始较早。例如德国利用飞行员心理选拔系统在飞行员预选方面取得了突出的成绩；前苏联 Prognoz 心理研究所对核电厂操纵员的研究表明，绩效水平的高低和某些特定的心理特质如责任感、情绪稳定性等密切相关；此外心理研究也涉及到了潜艇艇员、高速火车司机、空管人员等方面。

国内针对核电领域，还没有核电厂操纵员心理选拔所需要的各个维度，研究还不够深入。

针对中国核电厂操纵员，选择了 9 个与操纵员密切相关的核电厂事故进行了分析。研究最终得到核电厂操纵员的心理选拔系统包括认知能力、人格心理特质和心理健康 3 个方面。

1) 认知能力

中国核电厂操纵员的认知能力包括观察力、操作能力、注意力、记忆力、数量分析能力、逻辑综合判断能力等六个方面；

2) 人格特质

人格是一个人以特定方式进行行动的内在的结构与过程。人格心理特质包括合群性、决断性、自律性、情绪稳定性、风险处理能力、成就愿望等六个维度；

3) 心理健康

心理健康是操纵员正常操作的基本要求。本研究包括了躯体化、强迫症状、人际关系敏感、抑郁、焦虑、敌对、恐怖、偏执、精神病性等九个维度。

认知能力的测量可以通过专业心理学仪器进行；人格心理特质测量主要通过纸笔测验法和专家面试法；心理健康测量采用 SCL-90 量表^[6]。

其中： z_1 到 z_6 分别为合群性、决断性、自律、情绪稳定性、风险处理、成就愿望； S_1 到 S_9 分别为躯体

化、强迫症状、人际关系敏感、抑郁、焦虑、敌对、恐怖、偏执、精神病性。

表 2 数据展示了甲乙两个操纵员的相关心理特质数据，根据相关标准的比对，可以容易地得出操纵员甲为高绩效操纵员，操纵员乙的绩效较低。

2.5. 核电厂操纵员心理特质与绩效相关性评价研究

核电厂操纵员心理研究包括两个重要方面：心理特质与绩效相关性。在平行获取得到操纵员这两个方面的数据后，可以采用如下研究方案如图 4 所示进行研究。

为了得到操纵员心理特质和其绩效的关系，对 36 个操纵员的心理特质和其绩效进行相关性分析，结果如表 3 所示。

从表的结果可以看出，维度可以分成上下两个不同部分。上面的 6 个人格特质维度和绩效基本上都是正相关，维度得分越高，绩效越好。其中合群性、自律性以及情绪稳定性和工作绩效有明显的正相关(工作绩效是任务绩效和满意度的平均值)。下面的 9 个心理健康维度则都和绩效负相关，维度得分越高，绩效越差。其中强迫症状、人际关系敏感、抑郁和工作绩效有明显负相关。

通过对核电厂 36 个操纵员的心理特质和绩效进行测量得到的表 3 中的结果。并对操纵员的心理特质数据和绩效数据进行分析，可以得到如下结论：

1) 核电厂操纵员在 15 个心理特质维度上和常模存在着一定的差异。在自律性维度上比全国常模要低，情绪稳定性和风险处理维度则明显比全国常模要高。在躯体化、强迫症状、人际关系敏感、抑郁、焦虑、敌对、恐怖、偏执、精神病性 9 个心理健康维度上均比全国常模要低。这说明操纵员的总体心理素质水平较高。

2) 合群性、决断性、自律性、情绪稳定性、风险

Table 2. Psychic trait data
表2. 心理特质数据

	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9
标准	57	55	61	54	54	55	1.1	1.3	1.3	1.1	1.1	1.2	1.1	1.2	1.2
甲	66	64	62	50	58	56	1.1	1.4	1.3	1.1	1.1	1.2	1.0	1.3	1.4
乙	56	46	58	50	45	52	1.5	2.5	2.2	2.2	1.5	1.7	1.3	2.5	1.3

操纵员可靠性研究的相关多种方法

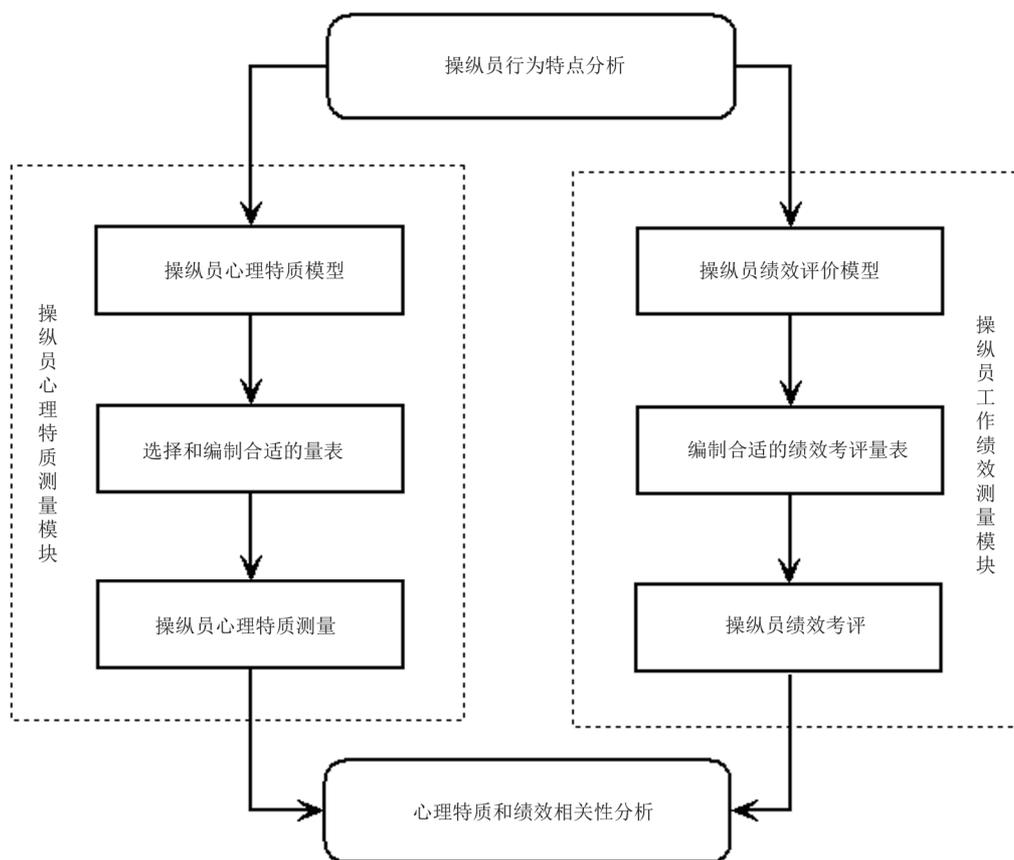


Figure 4. Research solution of relativity
图 4. 相关性研究方案

Table 3. The relativity analysis of psychic trait and performance
表3. 心理特质和绩效的相关性分析

	任务绩效	满意度	工作绩效
合群性	0.405*	0.413*	0.503*
决断性	0.381*	0.118	0.235
自律性	0.273	0.326	0.369*
情绪稳定	0.194	0.427*	0.388*
风险处理	0.240	-0.076	0.092
成就愿望	0.258	0.245	0.309
躯体化	-0.195	-0.231	-0.263
强迫症状	-0.192	-0.343*	-0.332*
人际关系敏感	-0.125	-0.413*	-0.338*
抑郁	-0.213	-0.410*	-0.388*
焦虑	-0.244	-0.027	-0.161
敌对	-0.086	-0.319	-0.255
恐怖	-0.013	-0.056	-0.044
偏执	-0.179	-0.344*	-0.326
精神病性	-0.035	-0.128	-0.102

*P < 0.05.

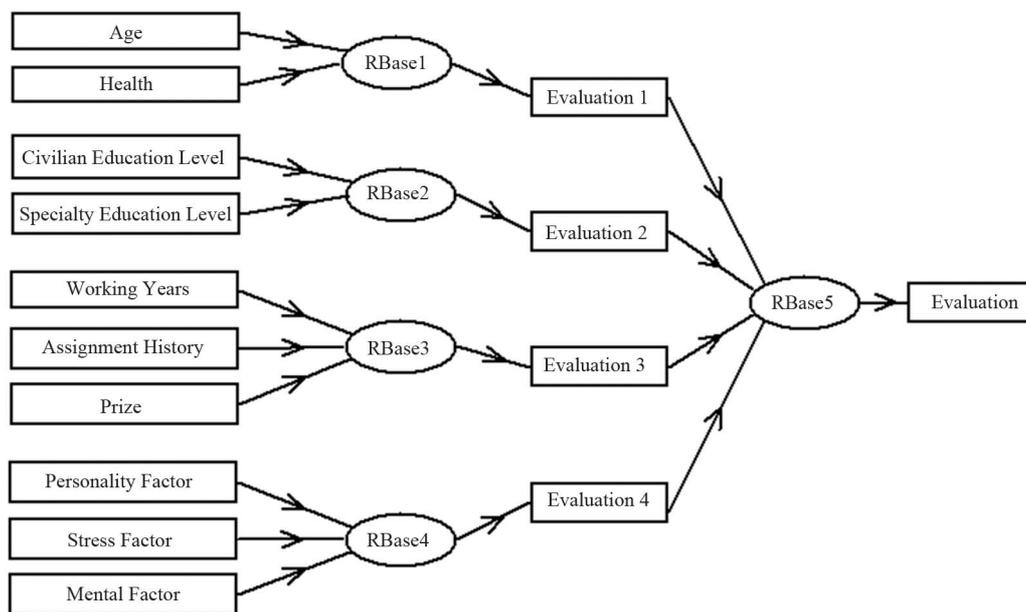


Figure 5. Fuzzy evaluation of expert system structure
图 5. 模糊评价专家系统逻辑框架

处理、成就愿望这 6 个人格特质维度都和工作绩效正相关，其中合群性、自律性以及情绪稳定性和工作绩效有明显的正相关。躯体化、强迫症状、人际关系敏感、抑郁、焦虑、敌对、恐怖、偏执、精神病性 9 个心理健康维度则都和工作绩效负相关，其中强迫症状、人际关系敏感、抑郁和工作绩效有明显负相关。这说明合群性、自律性以及情绪稳定性等 6 个人格特质维度得分越高，相应人员的工作绩效就越高；强迫症状、人际关系敏感和抑郁等 9 个心理健康维度得分越高，相应人员的工作绩效就越低。

3) 危险职业人员的心理特质和绩效间都存在着密切的关系,高绩效人员一般都具有很好的合作性、敢为性、冷静及心理健康。核电厂操纵员同样符合这一规律^[7]。

2.6. 核电厂操纵员可靠性研究中专家系统的应用

操纵员的可靠性研究涵盖了基本素质、岗位能力和心理相关因素等多种多个方面的多维度评价。这个过程是极其复杂的。而当把人、时间和相关环境等多种因素叠加在一起时，系统变得更加复杂而多维^[8]。此时，可以利用专家系统来进行高效的判断。如图 5 所示。

可以看到，前面谈到的各种对操纵员可靠性的研

究模型或方法都可以转换为操纵员总体最终评价的一部分，当评价的因素越完备，评价的规则越详尽时，得到的最终结果也会越全面和接近实际结果^[9]。

3. 结束语

本文对中国核电厂操纵员十几年来可靠性研究方法进行了回顾与探讨，从核电厂操纵员认知可靠性模型、模糊数学响应时计算、模糊综合评价和心理评价系统研究等方面对核电厂最重要的人的因素——核电厂操纵员进行了研究，该研究不仅会对保证核电厂的安全运行起到重要作用，而且其研究方法可为其他行业操纵员可靠性研究提供参考依据。

参考文献 (References)

- [1] 黄祥瑞等. 人的可靠性分析与面谈技巧[J]. 中南工学院学报, 1999, 13(2): 33-44.
- [2] 黄祥瑞. 可靠性工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991: 258-262.
- [3] 方向, 何旭洪, 赵炳全. 核电厂操纵员认知模型研究[J]. 原子能科学技术, 2006, 40(5).
- [4] X. Fang, Y. P. Zhou and F. Li. Nuclear power plant operator reliability research based on fuzzy math. Science and Technology of Nuclear Installations, 2011, Article ID 262585.
- [5] X. Fang, B. Q. Zhao. The nuclear power plant operators performance evaluation based on Borda method. SICPRO'04, 28-30 January 2004, Moscow.
- [6] 方向, 何旭洪, 赵炳全. 操纵员心理评价方法研究[J]. 原子能科学技术, 2007, 41(3).
- [7] X. Fang, X. H. He and B. Q. Zhao. The research of psychologi-

- cal characteristics and performance relativity of operators. Reliability Engineering and System Safety, 2008, 93(8): 1244-1249.
- [8] X. Fang, Z. Q. Yu. Research of China Investment Environment Evaluation. 2011 International Conference on Photonics, 3D-Imaging, and Visualization, 2001.
- [9] Y. P. Zhou, X. Fang and X. H. He. Use of an expert system in personnel evaluation process. 2011 IEEE International Conference on Quality and Reliability (ICQR), Bangkok, 14-17 September 2011: 15-19.