

核电厂数字化主控室班组布局协作行为方式可靠度模拟研究

王以群, 蒋建军^①, 张力^②, 李敏^③, 伍大清^④, 李鹏程^⑤, 张晓玲^⑥

(南华大学 经济管理学院, 湖南 衡阳 421001)

[摘要] 核电厂主控室运行过程一般由4-10人共同完成, 显然, 团队成员必须紧密合作才能完成任务, 该研究就是用来测试班组布局协作方式的效果。文章描述了班组布局四种协作行为方式, 每种类别的协作行为方式分为两种情况。实验过程设计了特定的语境、影响因子及蒸汽传热管断裂事故一回路的协作点, 通过模拟实验获得了每种协作方式的协作时间和失误率, 更好的协作方式及每种协作方式的性能。

[关键词] 核电厂主控室; 协作方式; 性能

[中图分类号] F123 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-0755(2015)06-0008-05

最近, 数字化工业系统中, 班组布局协作方式引起了广泛关注。核电厂数字化主控室中, 对连续出现的任务、信息、参数, 班组成员需共同完成相应的监视、状态评估、任务执行。班组协作效率、性能直接影响核事故规程处理的时间及正确性, 从而避免因班组协作问题所发生的事故。

有研究对班组安全管理提出了相应的方法, 针对安全责任建立了记录、检查表及考核方法^[1]。为提升班组水平, 有研究对发电厂班组建设设计了考评系统, 以对班组进行规范化、网络化管理^[2]。有研究对交通管制班组成员之间的协调, 利用交互模型建立了雷达管制行为班组模型^[3]。根据IDAC^[4-6]班组模型指出, 一个任务处理过程由信息处理、决策、执行及团队协作构成。IDAC模型的作者连续发表了5篇相关论文, 足以说明团队协作的重要性及不可忽略性。核电厂数字化主控室同样是由团队协作来完成, 例如: 二回路操纵员需帮助一回路操纵员完成任务, 值长需帮助操纵员做分析和决策等。从某种意义上讲, 核电厂数字化主控室班组协作的可靠性决定了核电厂运行过程中的整体可靠性。这样, 为提高核电厂运行过程的可靠性, 我们需要解决的问题为: (1) 提高人和系统的可靠性; (2) 提高班组布局协作行为的可靠

性。针对这种情况, 本文基于模拟实验研究核电厂数字化主控室操纵员班组布局常用协作行为方式的效果, 通过效果分析改善班组布局协作行为方式, 从而达到减少事故的目的。

一 方法体系

一般地, 一个事故的处理由多个步骤完成, 每一个步骤包括监视、决策、执行及班组协作, 本文主要对班组布局协作方式通过模拟得到协作方式的可靠度。

这部分主要描述某核电厂数字化主控室班组布局结构, 协作行为方式, 选取模拟实验人员及任务的情景因子, 事故协作点, 模拟实验描述。

(一) 某核电厂数字化主控室班组布局结构

一般地, 核电厂一个班组由4到10个成员构成^[7], 他们有着不同的任务。由于不同核电厂之间班组结构存在差异, 本文选取某核电厂数字化主控室作为研究背景, 图1显示了该班组布局结构。

从图1容易看出, 该班组布局由四人组成, 即: 一回路操纵员、二回路操纵员、值长及安工, 其中, 二回路操纵员必须根据一回路的执行情况, 协助一回路操纵员完成任务; 值长主要职责为对操纵员进行监督、技术支持; 安工一般在问题难以解决的时候需要给出解决方法和决策。

[收稿日期] 2015-10-20

[基金项目] 国家自然科学基金项目“大规模数字化控制系统中人的认知行为研究”、“数字化工业系统人因可靠性分析方法研究”资助(71071051, 71371070); 湖南省自然科学基金项目“基于人因可靠性的核电厂数字化主控室人机界面布局优化模型研究”资助(14JJ7046); 南华大学科研支撑项目“基于人因可靠性的数字化人机界面布局优化方法研究”资助(2012XQD54)

[作者简介] 王以群(1959-), 女, 湖南长沙人, 南华大学经济管理学院教授。

①南华大学经济管理学院讲师, 工学博士。②湖南工学院教授, 博士生导师。③南华大学计算机学院工程师。④南华大学计算机学院讲师。⑤南华大学经济管理学院副教授。⑥南华大学计算机学院硕士研究生。

(二) 协作行为方式

研究需要,在某核电厂数字化主控室进行了现场观察。为研究方便,把观察得到的班组布局主要协作行为方式进行分类和假设,观察得到的主要协作行为方式、假设的行为方式及分类见表1。

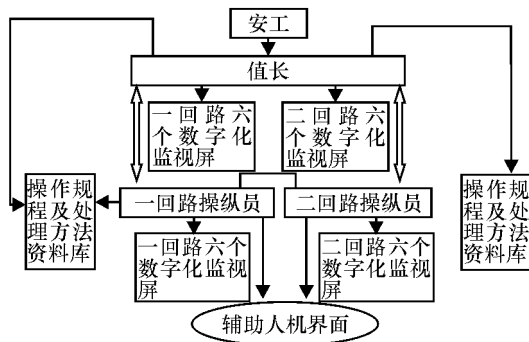


图1 某核电厂数字化主控室班组布局结构图

表1 班组布局主要行为协作方式及协作行为假设

类别	班组布局主要协作行为方式及行为假设	符号表示
1	值长不停来回走动与操纵员面对面交流(观察得到)	A1
	值长与操纵员之间直接通过对话进行交流(观察得到)	A2
2	操纵员遇到疑问时,直接去查阅相关资料库(观察得到)	B1
	操纵员遇到疑问时,与值长或另一操纵员沟通(观察得到)	B2
3	一回路或二回路操纵员与值长或安工进行沟通(观察得到)	C1
	一回路或二回路操纵员只与值长进行沟通(假设)	C2
4	值长遇到问题时,与安工沟通后再做出决策(观察得到)	D1
	值长遇到问题时,不与安工沟通,直接进行决策(假设)	D2

(三) 实验过程中参与人员及任务影响因子设定

实验过程中涉及到操作情景的设定,为研究方便,根据相关成果,本文在模拟实验过程中对情景影响因子取一般性的值,见表2。

表2 重要影响因子及模糊取值

影响因子分类	影响因子	影响因子模糊取值
外部影响因子 ^[8]	信息显示明确性、清晰性	好
	任务复杂性	一般
	操作规程	好
	人机界面	一般
	知识水平	好
内部影响因子 ^[9]	经验	熟练
	培训	好
心理因子 ^[10]	心理压力	一般

(四) 模拟实验描述

1、班组协作方式布局的实验变量表示

根据表1,本文把协作行为方式分成了4类,表示为:ORD1 = (A1, A2), ORD2 = (B1, B2), ORD3 = (C1, C2), ORD4 = (D1, D2)。模拟实验分别对这四类进行可靠度测试,且对每一类进行性能比较。

2、实验操作模拟规程

实验过程中,以核电厂蒸汽传热管断裂事故为背景,主要选取了该事故的DOS规程进行模拟。除了这些规程外,还有用来辅助完成任务的许多数字化人机界面。这些主要模拟规程及辅助规程由一回路和二回路相应的蒸汽传热管断裂事故规程构成。这些模拟规程及辅助规程根据实际规程及运行流程

通过 Visual Studio vb. net 2010 进行开发。由于规程界面较多,这里只列出其中一个,如图2。

3、实验过程设计

当执行事故规程时,操纵员需要不断地获取信息,做决策,然后根据系统状态进入事故规程的不同分支去完成相应的操作。如果操纵员在分析时遇到疑问,他们会与值长进行交流,以获得帮助。

三十一个大学生参加了模拟实验,年龄在19~21岁之间,被分成10个班组,每一组要完成事故处理过程中四种协作行为方式(每一组需要充当8种不同协作行为),充当安工角色的为同一个人。

为简化实验过程,对核电厂蒸汽传热管断裂事故过程一回路DOS操作规程只设计二十个班组协作点,因为二回路是用来辅助一回路完成事故操作的,因此二回路在该实验中不设班组协作点,只是在20个协作点上辅助一回路操纵员完成任务。班组布局协作行为方式就是在设定的这些交流点上进行测试,也就是说,这些设定的协作点为该班组布局协作行为方式可靠性分析提供了数据来源。核电厂蒸汽传热管断裂事故班组布局协作行为方式的协作点见表3。

实验过程中,操纵员在20个协作点上不培训,也就是说这些协作点操纵员均需与值长或安工进行交流来获取帮助。每个模拟班组在这些协作点上对表1所描述的每种协作行为方式进行10次模拟实验,也就是说,同一班组对SGTR事故进行10次模拟实验,本次实验共10个模拟班组。

本模拟实验大致过程如图3所示。

本文中,班组布局协作方式性能分析指标为协作花费的时间和失误率,这两个因子经常用于分析可靠度的效果。根据大部分情况,在可靠性分析中,失误率显得比时间更重要。

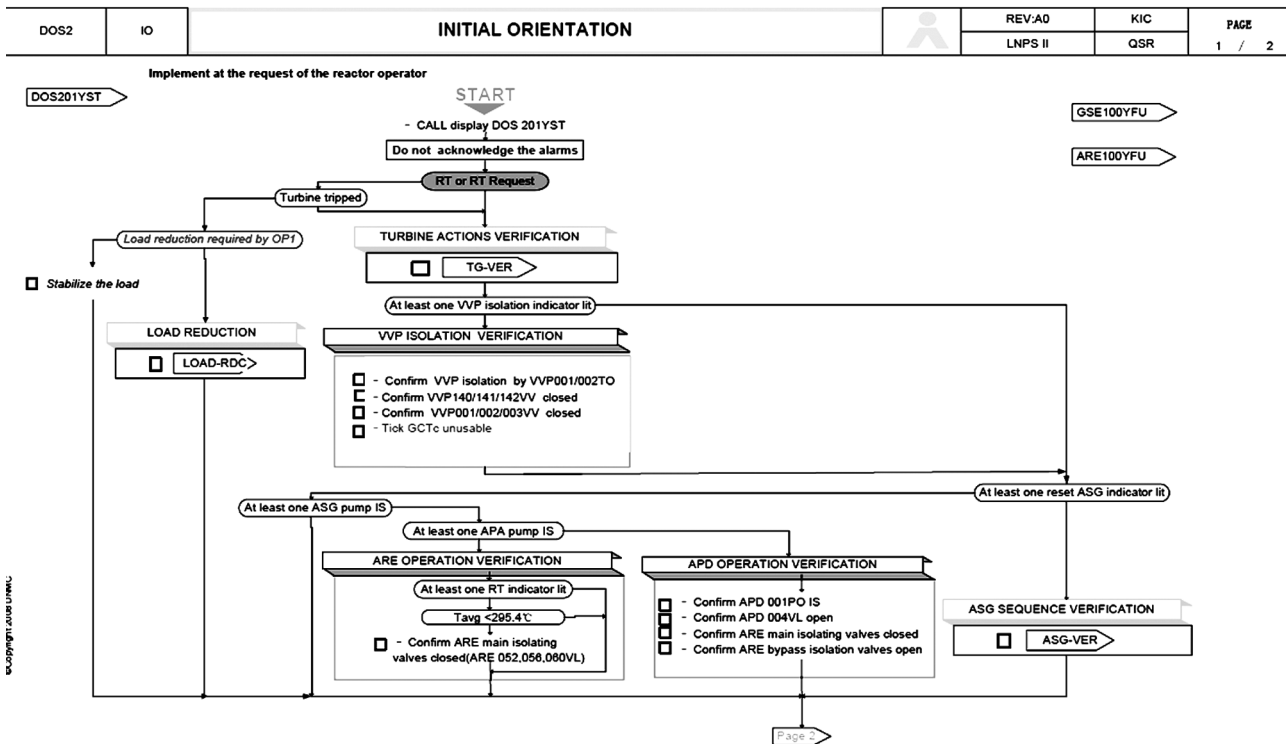


图 2 实验模拟规程

表 3 班组布局协作行为方式模拟实验的协作点

协作点描述	
1	判断: RCV 017VP on RCV 002BA
2	判断: REA on AUTO MAKEUP at the boron concentration of primary system
3	判断: RCV 375VP AND 376VP closed
4	判断: The volume of REA Boron tanks
5	判断: Sep RCP 404KU at the value of No load Set point (20% or -4m)
6	决策: RCV 048VP ON a AUTO
7	决策: SI-CHK
8	决策: EAS-CHK
9	重新设计(决策): SI signal by RPA 080KG and RPB 080KG
10	重新设计(决策): CIA signal by RPA 084KG and RPB 084KG
11	判断: the reactor trip by RPA 300TO and RPB 300TO
12	判断: the time of reactor trip in the RMC
13	判断: SI by RPA 058TO and RPB 058TO
14	判断: RIS 001 PO and 002PO IS
15	判断: all the CIA valve are close
16	判断: LHP IS by LHP 013KG
17	判断: SI Type A actuators in safety injection position (RPR002YBD)
18	判断: RIS 061VP and 062VP open
19	验证(判断): the arming of recirculation memory by RPA 369KS and RPB 369KS
20	执行(先判断再决策): RFLC sheet NO LE 103(Rack in the third RCV pump)

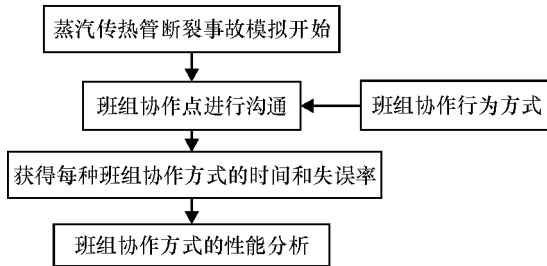


图 3 模拟实验过程

二 实验结果

(一) 每个班组布局协作行为方式的平均时间和失误差率

通过模拟实验, 获得的班组协作时间、失误差率及 P(T 检验, 置信水平设为 0.05) 值见表 4。

从表 4 中可以得到: (1) 从协作行为方式的平均时间看, A1 方式优于 A2 方式, B2 方式优于 B1 方式, C1 方式优于 C2 方式, D2 方式优于 D1 方式; (2) 从时间看, B1 协作行为方式的效率需要提高, ORD2(B1, B2)、ORD3(C1, C2)、ORD4(D1, D2) P 值小于 0.05, 表明这几种方式对可靠性有比较重要的影响; (3) 从协作行为方式的失误差率来看, A1 方式优于 A2, B1 方式优于 B2, C2 优于 C1, E1 优于 E2; (4) 从失误差率方面看, A1 和 C1 协作行为方式需要得到提高, ORD1(B1, B2)、ORD2(C1, C2)、ORD5

(D1, D2) P 值小于 0.05, 表明这三种协作行为方式对可靠性有重要影响。

表 4 模拟实验过程得到的班组布局协作行为方式的时间及失误差

班组协作行为方式	模拟实验次数	时间均值(秒)	协作时间 T 检验 P 值	失误差均值	失误差 T 检验 P 值
ORD1 (A1, A2)	A1	100	598	0.058	0.0429
	A2	100	656		0.0714
ORD2 (B1, B2)	B1	100	1233	0.000	0.0085
	B2	100	842		0.0229
ORD3 (C1, C2)	C1	100	596	0.000	0.0341
	C2	100	776		0.058
ORD4 (D1, D2)	D1	100	864	0.001	0.0144
	D2	100	782		0.012

(二) 每个协作点的平均协作时间

图 4、图 5、图 6、图 7 显示了每种协作行为方式在各个协作点协作时间的变化趋势。

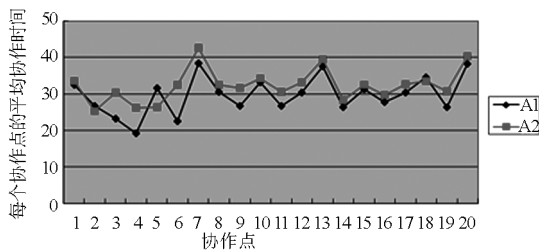


图 4 ORD1 (A1, A2) 协作序列在每个协作点的平均协作时间

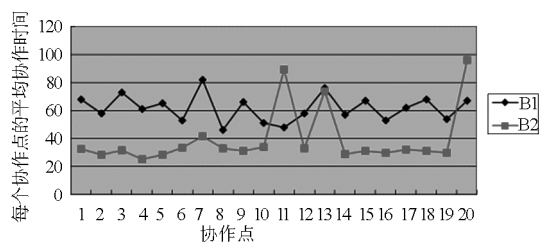


图 5 ORD2 (B1, B2) 协作序列在每个协作点的平均协作时间

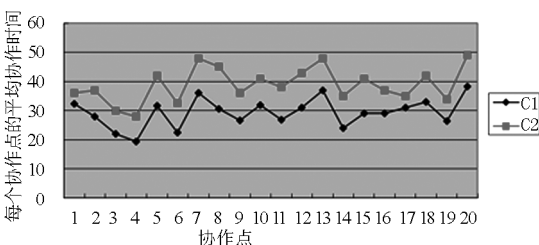


图 6 ORD3 (C1, C2) 协作序列在每个协作点的平均协作时间

从图 4、图 5、图 6、图 7 及表 4 分析可得到 4 种类别协作行为方式的效果为: (1) 除 B1 协作方式

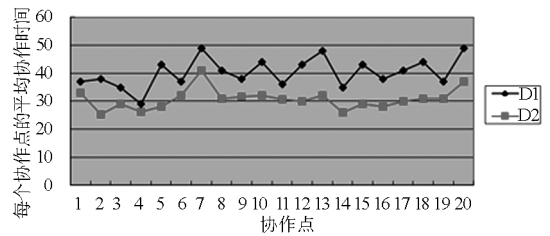


图 7 ORD4 (D1, D2) 协作序列在每个协作点的平均协作时间

外, 其他方式协作时间的差异比较小, 每种协作方式失误差率的差异较明显; (2) A2 方式的协作时间与失误差率优于 A1, 因此 A2 方式的性能优于 A1; (3) 根据前面的说明, 协作可靠度更侧重失误差率的性能, 因此, B2 方式性能优于 B1 方式, C2 方式的协作性能优于 C1, D1 方式性能优于 D2; (4) 第 8、第 13、第 20 这三个协作点的协作时间比其他协作点时间大, 因此, 这几个协作点的性能需要加强。

三 结论

该研究测试了核电厂数字化主控室班组协作行为的效果, 四种类别的班组布局协作方式通过模拟平台进行了实验。

模拟实验获得了每种类别协作方式的协作时间及失误差率, 分析了协作类型的性能、协作类型之间性能对比及哪些协作方式对可靠性影响较大。本研究也存在一些缺陷, 如: 实验平台为模拟平台, 与核电厂实际的操作规程、人机界面、运行数据变化有些差异; 实验中的参与人员与实验过程的场景与实际情况存在差异。

[参考文献]

- [1] 于千雅. 班组安全管理以及实行安全管理模式的探讨[J]. 企业管理, 2014(9): 74-76.
- [2] 霍妍, 毛楠. 发电厂班组建设考评系统开发设计[J]. 电子技术与软件工程, 2015(6): 81-81.
- [3] 刘永欣, 王含柏. 雷达管制班组协作模型[J]. 中国民航大学学报, 2014, 32(4): 5-8.
- [4] Y H J Chang, A Mosleh. Cognitive modeling and dynamic probabilistic simulation of operating crew response to complex system accidents: Part 1: Overview of the IDAC Model[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(8): 997-1013.
- [5] Y H J Chang, A Mosleh. Cognitive modeling and dynamic probabilistic simulation of operating crew response to complex system accidents. Part 2: IDAC performance influencing factors model[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(8): 1014-1040.
- [6] Y H J Chang, A Mosleh. Cognitive modeling and dynam-

- ic probabilistic simulation of operating crew response to complex system accidents: Part 3: IDAC operator response model[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(8):1041-1060.
- [7] Yung-Hsien Chang. Cognitive modeling and dynamic probabilistic simulation of operating crew response to complex system accident (ADA-IDACrew) [D]. Doctoral thesis, Department of materials and nuclear engineering, 1999.
- [8] Malone T B, M Kirkpatrick, et al. Human factors evaluation of control room design and operator performance at three mile island-2[M]. Nuclear Regulatory commission, 1979.
- [9] Kecklund L J, O Svenson. Human errors and work performance in a nuclear power plant control room: association with work-related factors and behavioral coping[J]. Reliability engineering and system safety, 1997 (56): 5-15.
- [10] Swain A, and H E Guttman. Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications[M]. Nuclear Regulatory Commission, 1983.

The Reliability Simulative Study of Collaboration Behaviour Way for Team layouts in Digital Main Control Room of Nuclear Power Plant

Wang Yi-qun, Jiang Jian-jun, Zhang Li, Li Min, Wu Da-qing, Li Peng-chen, Zhang Xiao-ling
(University of South China, Hengyang, 421001, China)

Abstract: A running process in main control room of Nuclear Power Plant(NPP) is executed together by four to ten operators. Obviously, the team members must closely cooperate to finish tasks. This study tested the effect of different collaboration types of team layout. This paper described four collaboration behavior ways of team layout that each collaboration behavior way included two different collaboration ways. In the experiment process, the authors set particular context, influencing factors and collaboration point of primary loops of Steam Generator Tube Rupture(SGTR) accident. The collaboration time and error probability of each type of collaboration are obtained by the simulated experiment, better team collaboration way for each collaboration type and the performance of each kind of collaboration way are also obtained.

Key words: main control room of nuclear power plant; collaboration way; performance