

核电厂主控室操纵员疲劳状态对认知的影响及疲劳恢复方法的研究

楼捷¹, 万凯进², 詹秀奇¹, 吴俊³

¹中广核核电运营有限公司培训中心, 广东 深圳

²大亚湾核电运营管理有限公司培训部, 广东 深圳

³华南师范大学心理学院, 广东 广州

收稿日期: 2024年9月5日; 录用日期: 2024年9月18日; 发布日期: 2024年10月31日

摘要

核电人因安全是核电安全领域的核心问题。本研究通过对国内某核电厂的操纵员进行全范围模拟机综合场景训练过程中, 分别于训练前和训练后进行疲劳检测任务和认知评估任务, 以评估操纵员在完成模拟机典型工况训练后的疲劳状态及其对认知情况的影响。实验结果表明, 高负荷的操作工况导致操纵员的注意稳定性出现了明显下降。本研究还测试了3种不同的休息方式对于疲劳恢复的效果, 闭目养神和听音乐能有效恢复疲劳, 而玩手机在主观上感受得到了休息放松, 但实际反而加剧疲劳。

关键词

核电, 主控室, 认知, 疲劳恢复

Study on the Influence of Fatigue State on Cognition of Operator in Main Control Room of Nuclear Power Plant and Fatigue Recovery Method

Jie Lou¹, Kaijin Wan², Xiuqi Zhan¹, Jun Wu³

¹Training Center of CGN Nuclear Power Operations Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

²Training Department, Daya Bay Nuclear Power Operation Management Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

³School of Psychology, South China Normal University, Guangzhou Guangdong

Received: Sep. 5th, 2024; accepted: Sep. 18th, 2024; published: Oct. 31st, 2024

文章引用: 楼捷, 万凯进, 詹秀奇, 吴俊. 核电厂主控室操纵员疲劳状态对认知的影响及疲劳恢复方法的研究[J]. 核科学与技术, 2024, 12(4): 333-340. DOI: 10.12677/nst.2024.124033

Abstract

Nuclear human factor safety is the core issue in the field of nuclear power safety. In this study, the fatigue detection task and cognitive assessment task were carried out before and after training during the comprehensive scenario training of the full-range simulator for the operators of a nuclear power plant in China, in order to evaluate the fatigue state of the operators after the typical simulator training and its influence on cognition. The experimental results show that the attention stability of the operator decreases obviously under high-load operating conditions. This study also tested the effect of three different rest methods on fatigue recovery. Closing eyes and listening to music can effectively recover fatigue, while playing mobile phones can subjectively feel rest and relaxation, but actually aggravate fatigue.

Keywords

Nuclear Power, Main Control Room, Cognition, Fatigue Recovery

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

安全问题是核电领域中的核心问题。而在三里岛核泄露事件后, 研究者们越来越意识到, 人因所导致的安全问题的重要性。更进一步的研究发现, 核电事件中有很大的比例都是由于人因失误所导致。根据国内的调查显示, 人因事件在核电事故中所占的比例也较高。以某集团为例, 2018 年 LOE (Licensing Operational Event, 执照运行事件) 事件中人因事件占比达 55% [1]。在这个基础上, 研究者提出, 人因安全应该与硬件安全同等重要[2]。

国内核电企业很早就开始重视人因防控的工作, 例如国内某核电企业于 2002 年起引入 INPO (Institute of Nuclear Power Operations, 美国核电运行研究所) 防人因理念, 经过二十年的发展形成了较为完整的防人因课程体系及一系列防人因软硬屏障, 人因事件数量从高位迅速下降。通过分析国内核电厂的人因失误预防方法发现, 这些方法主要分为员工行为规范和管理屏障两方面。然而, 很多人因事件的发生往往都是由于人员在高强度的操作过程中疲劳或者认知状态不佳所导致的。例如, 由于人员早班疲劳、睡眠不足, 导致操作失误。例如, 某核电企业主控室操纵员控制棒棒位设置错误等事件, 此类事件中多起事件原因就在于操纵员早班疲劳、睡眠不足, 因人员状态不佳造成的人因事件发生。但是无论是国内还是国外, 对于人因防控中更为核心的实时心理评估, 尤其是与操作过程直接相关的疲劳以及认知评估较少涉及。对于主控室关键岗位人员状态检测还未开展, 没有诊断识别人员状态的防人因失误屏障。

通过对主控室操纵员的人因失误的分析, 疲劳, 尤其是认知疲劳可能是导致人因失误的关键原因。而核电站主控室工作环境的特殊性, 则会比普通的工作环境更容易诱发认知疲劳。首先, 主控室操纵员工作内容的复杂性和高强度容易导致认知疲劳。由于核电站系统异常复杂, 这导致主控室操纵员的工作涉及非常复杂的行为操作, 而且这种操作往往需要较长时间。此外, 这种复杂的工作环境需要操纵员注意力集中, 调动更多的认知资源, 才能较为准确和快速地完成工作。因此, 这些原因都会让操纵员非常容易地产生认知疲劳。此外, 主控室较强的工作压力也是导致认知疲劳的一个重要原因。核电站是一个

极端重视安全性的工作环境，而这种对于安全的重视，以及核电事故可能带来的不可挽回的极端后果，会使得操纵员在工作过程中具有较大的工作压力，尤其是面对较为危机和紧急工况下压力会更大，而这些压力也会使得操纵员在完成复杂操作后出现更为明显的认知疲劳。最后，操纵员特殊的工作时间也是其认知疲劳的另外一个重要原因。核电站的运行必须是 24 小时不间断进行，这就要求操纵员必须采用倒班制的方式进行工作，从而导致其睡眠不足或者睡眠质量不高，这会让操纵员在面对日常的工作时更容易出现认知疲劳。

因此，全面地评估和检测主控室操纵员的认知疲劳，以及这种认知疲劳对行为的具体影响，一方面可以更好地了解人类在高压环境下进行复杂工作后对认知的影响；更加重要的是，可以通过直接和量化地评估认知疲劳，以及认知疲劳和人因风险的关系，为后续对操纵员的实时认知评估提供重要的实证基础，也为制定有针对性的改善认知疲劳的方法提供重要的参考价值，进而建立更有效的人因屏障。

2. 实验方法

2.1. 被试

核电厂操纵员 15 人，均为男性，年龄在 27~38 岁，均为右利手，矫正视力正常。

2.2. 测试内容

每位操纵员从周一至周五，分别完成 2 次行为学测试，2 次生理测试，为期 3 周，一共完成 30 次测试。

被试进入模拟机训练休息室后，先进行前测，完成测评任务后进入模拟机室完成 3 小时典型工况的模拟机操作训练；训练结束后再进行后测，后测与前测任务相同。测试包括 PVT 任务、画圈任务、工作记忆任务以及 GO/NOGO 任务。生理测试包括脑电、心率和皮肤电。

实验结构框图见图 1。

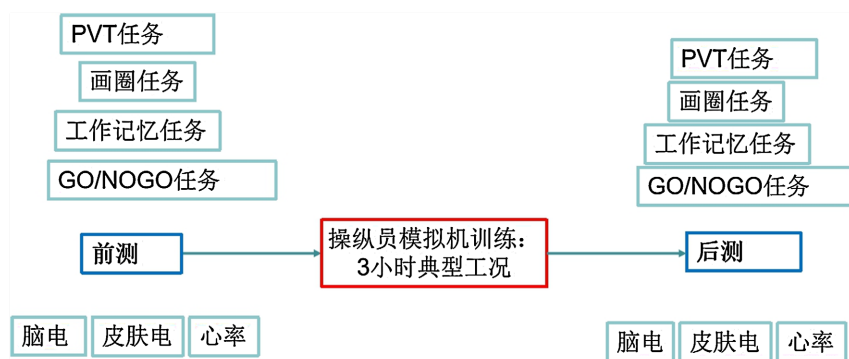


Figure 1. Experimental structure block diagram

图 1. 实验结构框图

2.3. 疲劳检测任务

精神运动警觉性任务(Psychomotor Vigilance Task, PVT)是一个简单反应时测试任务，常用于测量航空航天及相关作业产生的疲劳。该任务通过检测被试对突发信号的响应，评估被试持续注意的能力[3]。本实验每次 PVT 任务的时长为 3 分钟，每个试次开始时呈现红色注视框，呈现时间为 0.5~2.5 s，一旦红色注视框变成黄色，要求被试尽快按数字 1 键反应，被试按键后或 5 s 内未按键，自动进入下一个试次。

一个试次结束后呈现按键反应时，抢按或未按键则呈现对应提示语。

2.4. 认知评估任务

2.4.1. 动作稳定性监控任务

跟踪转子任务(pursuit rotor task)是一个简单的纯视觉运动跟踪测试，被试必须用一只手控制鼠标，追逐位于圆形外边缘的红色目标。被试通过他们的视觉系统识别红色目标的精确空间位置，用眼球运动追踪它，并使用他们的肩膀、肘部和手腕关节控制特定的连续运动。跟踪转子任务在很大程度上要求手和手指的灵活性，以及手眼的协调性。这显示了对程序性记忆的测量，同时也展示了参与者的运动控制功能[4]。本实验中每次转子任务包含 8 个试次，时间约 3 分钟。

2.4.2. 注意稳定性监控任务

Go-NoGo 就是一种研究反应抑制的常用范式，反应抑制指抑制不符合当前需要的或不恰当行为反应的能力以及随意注意的能力。研究发现，当被试经历长时间的工作负荷后，会带来明显的疲劳，相应的注意稳定性下降，相应地抑制能力也会下降，从而在该任务中表现明显变差[5]。本实验中每次 Go-NoGo 任务包含 40 个试次，时长约 3 分钟。Go-NoGo 任务的刺激序列由随机呈现的两种声音：“嘀”和“嘀嘀”组成，在 Go 任务中，听见“嘀”声后，点击鼠标左键两下，听见“嘀嘀”声后，点击鼠标左键一下；在 NoGo 任务中，听见“嘀”声后，点击鼠标左键两下，听见“嘀嘀”声后，不进行按键。

2.4.3. 工作记忆任务

工作记忆任务测试图形工作记忆，记忆材料包含高、低两种难度。任务先呈现 600 ms 的箭头，提示记忆图片的位置，之后呈现 100 ms 的记忆图片，间隔 900 ms 后，呈现另一幅测试图片 1500 ms，要求被试判断测试图片与记忆图片的图形和位置信息是否一致，一致则按 1 键，不一致则按 2 键。模拟机训练前后分别进行共约 3 min 的工作记忆任务。

除了一些众所周知的英文缩写，如 IP、CPU、FDA，所有的英文缩写文中第一次出现时都应该给出其全称。文章标题中尽量避免使用生僻的英文缩写。

3. 实验结果

3.1. PVT 实验结果

研究者使用配对样本 t 检验，对 PVT 任务的平均反应时进行统计检验，见图 2，发现后测的平均反应时显著大于前测的平均反应时($t = -2.32, p = 0.03$)。这表明操纵员在进行 3 小时的模拟训练之后，PVT 任务的反应时明显变慢，疲劳程度明显增加。

3.2. 旋转质子实验结果

研究者使用配对样本 t 检验，对鼠标距离目标之间的平均距离进行统计检验，见图 3，发现后测和前测之间并没有显著差异($t = -0.722, p = 0.481$)。这表明操纵员在进行 3 小时的模拟训练之后并不会对简单的旋转质子任务造成影响。

3.3. Go-NoGo 任务实验结果

研究者使用配对样本 t 检验，对 Go-NoGo 任务下前测和后测的反应准确率进行统计检验，见图 4，发现后测成绩显著差于前测($t = 2.27, p = 0.04$)。这表明 3 小时的模拟机训练对操纵员注意稳定性造成了明显的影响。

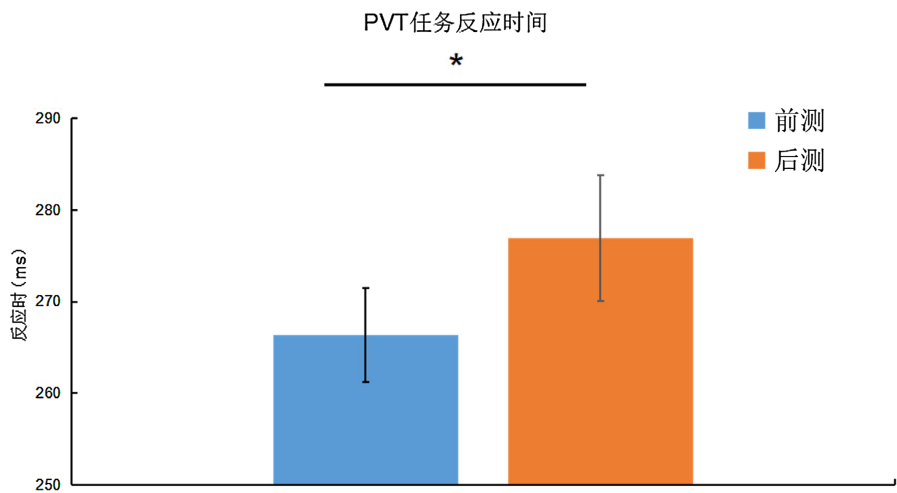


Figure 2. Average reaction time of pre-test and post-test in PVT task
图 2. PVT 任务中前测和后测的平均反应时

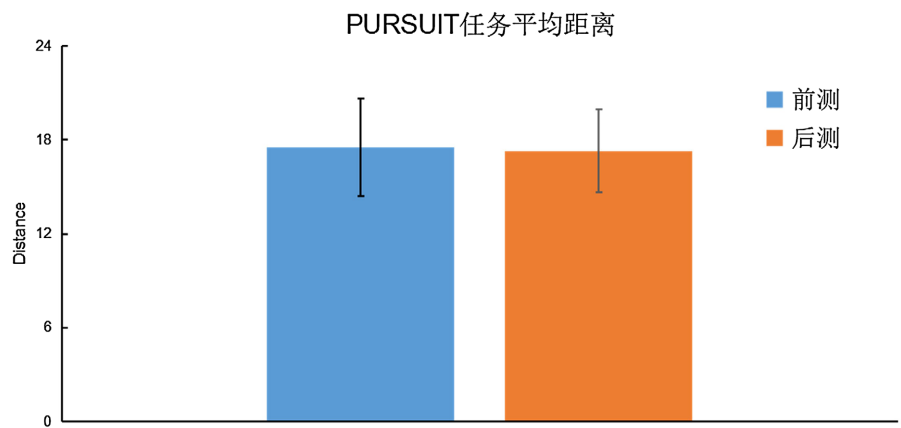


Figure 3. Mouse distance from target for the pre-test and post-test in pursuit rotor task
图 3. 旋转质子任务中前测和后测的鼠标与目标距离

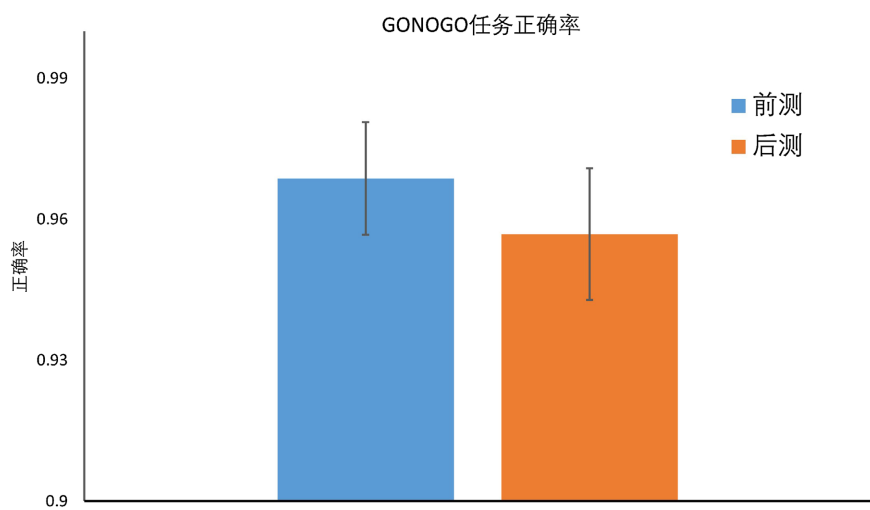


Figure 4. Correct rate of response for the pre-test and post-test in Go-NoGo task
图 4. Go-NoGo 任务中前测和后测的反应正确率

3.4. 工作记忆检测(图片匹配任务)

在操纵员模拟训练前后进行图片匹配任务,用以评估训练前后工作记忆的差异,选取前后测的图片匹配任务的反应时和正确率进行比较,进行统计检验,见图 5,发现后测的反应时明显快于前测($t=4.16$, $p=0.009$),后测的正确率略低于前测,见图 6。操纵员工作记忆检测的结果表明,在模拟机训练前后,操纵员在图片匹配任务中的表现有差异,表明 3 小时的模拟机训练对完成图片匹配任务造成了影响,但并没有显著的差异。

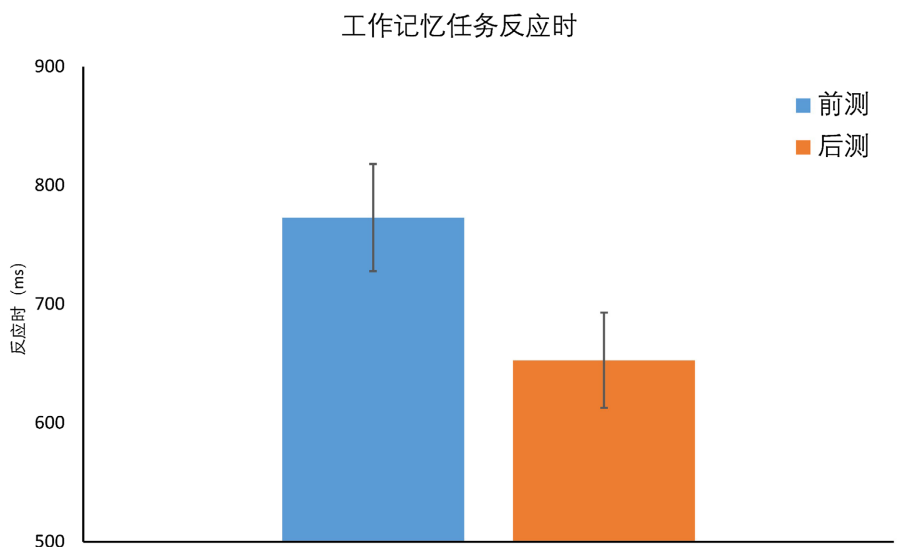


Figure 5. Response time in working memory task

图 5. 工作记忆任务反应时

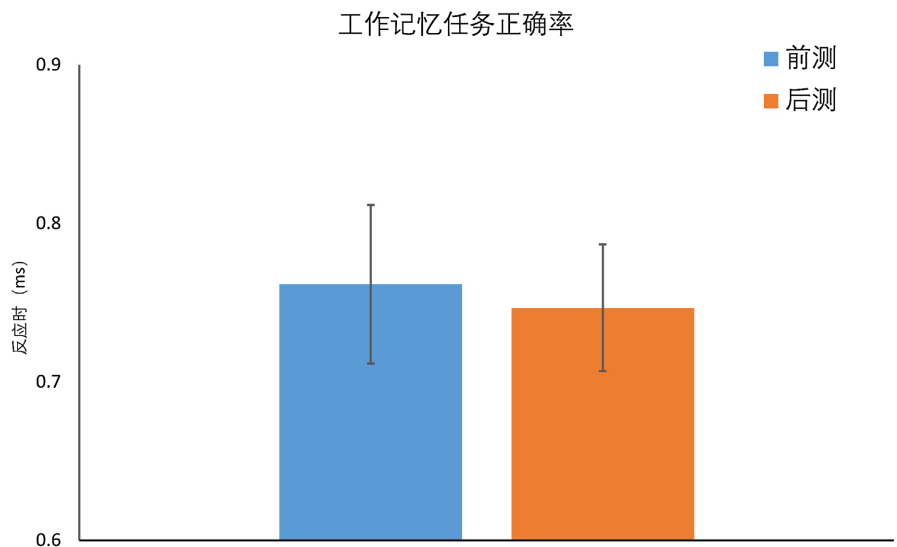


Figure 6. Correct rate of response in working memory task

图 6. 工作记忆任务正确率

3.5. 生理测试结果

通过对操纵员模拟机前后的脑电数据进行检测,进行数据处理和频谱分析,发现 3 小时训练后操纵

员脑电中的 β 波和 γ 波都有显著上升, 说明 3 小时的模拟机训练对操纵员的生理状态造成了影响, 可能会导致注意力等认知功能的变化。

对操纵员训练前和训练后的心率数据进行分析, 得出结果, 3 小时训练后, 每分钟的心率增加, 这是由于长时间的训练产生了一定的体力负荷, 随着负荷的增加, 心跳变快。

心率变异性(Heart Rate Variability, HRV)是公认的测量应激水平的可靠指标, 当精神疲劳发生时会发生敏感的变化, 操纵员的疲劳与长期或高强度应激反应密切相关。心率变异性的高频成分 HF 反映心脏迷走神经的活性, 低频成分 LF 反映交感神经的活性, LF/HF 反映了交感神经和迷走神经对心率调节的平衡状态。3 小时的训练, 随着时间推移, 被试存在低频能量降低, 高频能量增加的特征。

脑电和心率变异性对于疲劳监测较为灵敏。而皮肤电数据由于个体差异较大, 每个人对皮电指标的敏感程度不一样, 皮肤电并非是检测负荷或疲劳的最佳方案。

3.6. 不同疲劳恢复方法的效果测试

在操纵员模拟训练结束并完成上述测试后, 进行三种不同方式, 分别为闭目养神、听音乐和玩手机, 时间为 15 分钟。休息前后进行 PVT 任务, 时长为 5 分钟, 每个试次开始时注视屏幕上绿、蓝、黄三个控件, 呈现时间为 0.5~2.5 s, 一旦某个控件变成红色, 要求被试尽快按对应的键反应, 被试按键后或 5 s 内未按键, 自动进入下一个试次。在休息前后进行主观疲劳测评, 使用 6 分, 没有中间值的李克特量表。

结果见图 7, 主观上, 操纵员感觉三种休息方式都有助于疲劳恢复, 而 PVT 结果表明, 闭目和听音乐有助于疲劳恢复, 玩手机则进一步增加反应时, 加剧疲劳。

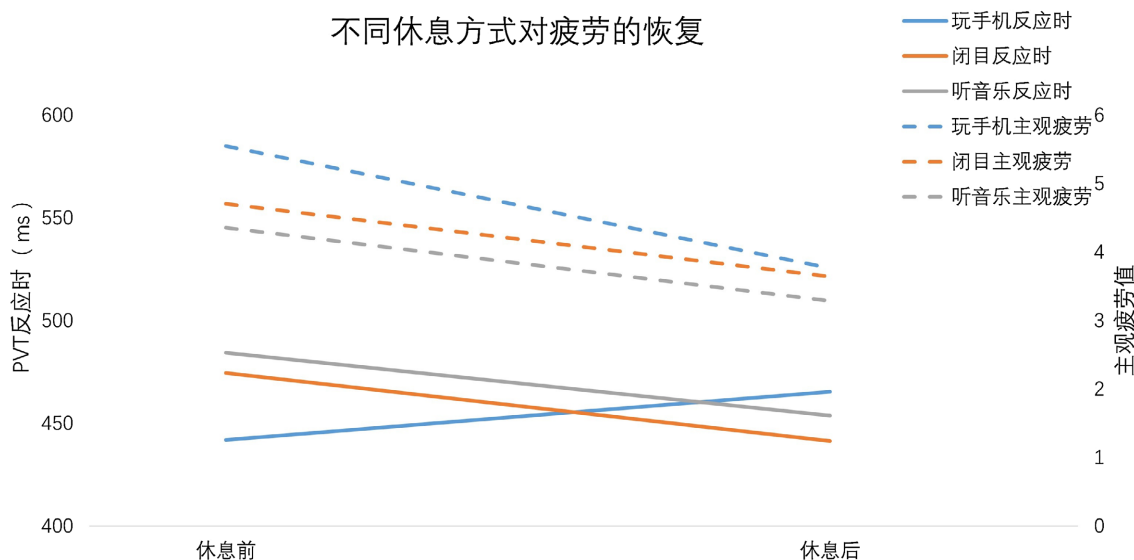


Figure 7. Test results of different fatigue recovery methods

图 7. 不同疲劳恢复方法效果测试结果

4. 讨论

研究结果发现, 操纵员完成 3 小时的典型工况操作后, 相比于操作前, 其 PVT 任务的反应时显著上升, 出现了非常明显的认知疲劳。更进一步地, 本研究发现操纵员完成典型的核电工况前后, 在质子旋转任务和工作记忆任务中都保持了较高的水平, 且前后没有明显差异, 说明虽然高负荷的工作后诱发了明显的认知疲劳, 但并未对动作稳定性和工作记忆造成明显的影响。而 Go-NoGo 任务的正确率出现了明

显下降。这提示高负荷的操作工况导致操纵员的注意稳定性出现了明显下降。注意稳定性下降会导致操纵员降低对于关键信号和关键操作的敏感性, 让其反应速度明显变慢, 并可能出现错误反应, 从而导致人因失误。

这个结果一定程度上验证了基础心理学研究的发现。具体来说, 操纵员典型的工况由于涉及了较高的工作负荷, 从而导致操纵员出现了明显的认知疲劳。而认知疲劳由于会明显地削弱警觉能力[6], 以及注意广度会变狭窄[7]。操纵员的操作工序本身较为复杂, 而且有时候可能会由于工作要求, 需要连续地处理多个复杂的操作工序, 或同时关注多个参数, 而疲劳所伴随的警觉能力下降, 则会让操纵员更容易忽略关键信息, 更容易出现操作失误, 极大地增加了人因风险。此外, 注意狭窄同时也会进一步地减少操纵员之间的相互交流, 操作的决策更加依赖个人而不是班组, 这会极大地降低最终决策的可靠性。这些因素共同导致了操纵员注意稳定性的下降。未来的研究可以通过精细的认知实验进一步分离这两个因素在注意稳定性上的影响, 以更全面地了解操纵员认知疲劳后注意稳定性下降的核心原因。

认知疲劳导致操纵人员注意稳定性的下降, 但是似乎认知疲劳并不会对操纵员的动作稳定性造成影响。心理学的研究发现, 高工作负荷和认知疲劳后, 一定程度上会导致动作稳定性的下降, 从而带来人因风险。然而本研究却发现, 操纵员就算出现了认知疲劳, 甚至注意稳定性出现了明显下降, 其动作稳定性依然保持在较高的水平。研究者认为一个可能的原因是操纵员长时间的培训和训练, 使得这个群体在动作操作能力上具有较高的水平, 因此就算处于认知疲劳也不会对其动作稳定性造成影响。此外, 考虑到动作行为相对属于较为低层次的认知操作过程, 而认知疲劳主要体现在高级认知过程(如注意、记忆和执行功能等), 因此本身操作能力较强的操纵员, 其动作稳定性相对不受认知疲劳的影响也是可能的。

本研究还测试了三种不同休息方式的疲劳恢复效果, 结果表明, 虽然玩手机的方式在主观上感受到了休息放松, 但实际反而加剧疲劳。由于核电厂主控室复杂的工作环境需要操纵员注意高度集中, 调动更多的认知资源, 才能较为准确和快速地完成工作。因此, 在疲劳恢复上要避免玩手机这类仍然需要消耗认知资源的方式。本研究的结果可为后续研究者进行操纵员实时地认知评估提供了一定的参考。更加重要的是, 也提示核电厂在构建防人因屏障中, 要将认知疲劳, 尤其是认知疲劳所伴随的心理和行为状态的变化作为人因监控的关键指标, 通过进一步的应用研究和具体实践, 建立认知疲劳监控和消退的有效途径, 才能更好地构建安全高效的人因屏障。

参考文献

- [1] 孙树海, 陶书生, 郑丽馨, 等. 近年来核电厂执照运行事件趋势分析[J]. 核安全, 2018, 17(1): 12-19.
- [2] Carvalho, P.V.R., Santos, I.L.D. and Vidal, M.C.R. (2006) Safety Implications of Cultural and Cognitive Issues in Nuclear Power Plant Operation. *Applied Ergonomics*, **37**, 211-223. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2005.03.004>
- [3] 张英, 陈晨, 刘振华, 等. 精神运动警觉性任务在不同知觉负荷下的疲劳状态监测[J]. 心理学探新, 2018, 38(4): 377-384.
- [4] Hatakenaka, M., Miyai, I., Mihara, M., Sakoda, S. and Kubota, K. (2007) Frontal Regions Involved in Learning of Motor Skill—A Functional NIRS Study. *Neuroimage*, **34**, 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.08.014>
- [5] Groot, A.S. (2010) Familial Influences on Sustained Attention and Inhibition in Preschoolers. *Journal of Child Psychology & Psychiatry & Allied Disciplines*, **45**, 306-314. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2004.00222.x>
- [6] Matthews, G., Davies, D.R., Stammers, R.B. and Westerman, S.J. (2000) Human Performance: Cognition, Stress, and Individual Differences. Psychology Press.
- [7] Braunstein-Bercovitz, H., Dimentman-Ashkenazi, I. and Lubow, R.E. (2001) Stress Affects the Selection of Relevant from Irrelevant Stimuli. *Emotion*, **1**, 182-192. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.1.2.182>