

中文引用格式:胡鸿,武江,张勉,等. 摇摆、时间压力对 DCS 操作员监视绩效和工作负荷的影响[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(11):9-16.

英文引用格式:HU Hong, WU Jiang, ZHANG Mian, et al. Effects of vibration and time pressure on monitoring performance and workload of operators in DCS[J]. China Safety Science Journal, 2024,34(11):9-16.

# 摇摆、时间压力对 DCS 操作员监视绩效和工作负荷的影响\*

胡鸿<sup>1</sup>教授, 武江<sup>2</sup>工程师, 张勉<sup>3</sup>, 沈超<sup>2</sup>高级工程师,  
易灿南<sup>\*\*1</sup>教授, 赵彩俊<sup>1</sup>讲师

(1 湖南工学院 安全与管理工程学院, 湖南 衡阳 421002; 2 中广核研究院有限公司, 深圳 广东 518000; 3 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001)

中图分类号: X912.9

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.11.0362

基金项目:湖南省自然科学基金资助(2024JJ5122, 2020JJ4263);大学生创新创业训练计划项目(S202411528046, S202411528064)。

**【摘要】** 为了解摇摆、时间压力对数字化控制系统(DCS)操作员监视作业的影响,降低人因失误,设计监视试验获得摇摆(静止、低和高)和时间压力(无时间压力和有时间压力)条件下操作员监视绩效和工作负荷;运用统计学方法分析摇摆和时间压力对监视绩效和工作负荷的影响。结果表明:摇摆对监视绩效(监视时间和正确率)和工作负荷影响均不显著,但随着摇摆级别的增加,监视时间和工作负荷呈现上升趋势;时间压力显著影响监视时间和工作负荷,但对正确率影响不显著;监视任务中,状态确认任务用时显著多于数据比较任务,但正确率差异不显著。摇摆条件下 DCS 操作员监视绩效和工作负荷与静止条件基本一致;有时间压力条件下,DCS 操作员监视工作负荷较大,但监视时间较短。

**【关键词】** 摇摆; 时间压力; 数字化控制系统(DCS); 操作员; 监视绩效; 工作负荷

## Effects of vibration and time pressure on monitoring performance and workload of operators in DCS

HU Hong<sup>1</sup>, WU Jiang<sup>2</sup>, ZHANG Mian<sup>3</sup>, SHEN Chao<sup>2</sup>, YI Cannan<sup>1</sup>, ZHAO Caijun<sup>1</sup>

(1 School of Safety and Management Engineering, Hunan Institute of Engineering, Hengyang Hunan 421002, China; 2 China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518000, China; 3 School of Resources Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang Hunan 421001, China)

**Abstract:** To explore the effects of vibration and time pressure on monitoring tasks in DCS and reduce human error, a monitoring experiment was designed to measure the monitoring performance and workload under vibration conditions (static, low and high) and time pressure conditions (no time pressure and time

\* 文章编号:1003-3033(2024)11-0009-08; 收稿日期:2024-07-10; 修稿日期:2024-09-15

\*\* 通信作者:易灿南(1981—),女,湖南宁乡人,博士,教授,主要从事职业安全与健康以及人因工程方面的研究。E-mail:yicannan310@126.com。

pressure). Statistical methods were used to explore the influence of vibration and time pressure on the monitoring performance and workload. The results show that the vibration (monitoring time and accuracy) has no significant effect on monitoring performance. Both the monitoring time and the workload show rising trends with the increase of the vibrating level. The time pressure has a significant impact on monitoring time and workload, but has no significant impact on accuracy. The monitoring time in the state confirmation task is significantly longer than that of data comparison, but the accuracy difference is not significant. The monitoring performance and workload of DCS operators in the vibrating condition are basically the same as that in the static condition. In the time-pressure condition, the DCS operators' workload is heavy, but the monitoring time is short.

**Keywords:** vibration; time pressure; digital control system (DCS); operator; monitoring performance; workload

## 0 引言

近年来,随着计算机与通信技术的发展,核电<sup>[1]</sup>、船舶运输<sup>[2]</sup>、煤矿<sup>[3]</sup>以及轨道交通<sup>[4]</sup>等工业系统逐渐数字化,计算机工作站取代传统模拟控制界面。在这些数字化控制系统(Digital Control System, DCS)中,操作员通过监视重要仪器设备运行参数、图形变化趋势和仪表控制系统工作状态<sup>[5]</sup>,实现对系统的安全控制。因此,操作员监视作业是DCS人因可靠性研究重点关注的对象。

在一些DCS中(如海上浮动核电站、船舶等),操作员在摇摆条件下维持身体平衡并监视系统运行,其工作环境晃动幅度较大、频率较低(频率 $<1$  Hz)。因此,DCS操作员监视绩效和工作负荷可能受摇摆条件影响。文献检索发现,摇摆显著影响工作负荷,但对工作绩效的影响则与任务类型有关。针对指点作业,TAO Da<sup>[6]</sup>和LIN Joe Chiuhsiang<sup>[7]</sup>等开展点击相关试验,发现随着摇摆级别升高,任务时间增长,正确率降低,工作负荷增大。针对视觉搜索任务,XUE Hongjun<sup>[8]</sup>和TAO Da<sup>[9]</sup>等研究发现,摇摆虽然显著影响工作负荷,但对工作绩效影响并不显著。未检索到摇摆条件下DCS操作员监视相关文献。因此,摇摆条件对DCS操作员监视绩效和工作负荷的影响还有待探究。

在DCS中,特别是在大型复杂系统中(如核电站),由于系统安全性、可靠性要求以及在紧急情况下应急措施处置要求,操作员时间压力较大<sup>[10]</sup>。现有研究表明:时间压力是诱发人因失误的主要原因之一<sup>[11]</sup>,与工作绩效存在线性关系(正面<sup>[12]</sup>或负面<sup>[13]</sup>影响)或非线性关系<sup>[14]</sup>。也有研究显示,时间压力对人因失误/可靠性影响不显著,但显著影响工作负荷和任务时间<sup>[15]</sup>。一些学者探究了核电DCS

中时间压力与操作员绩效及工作负荷的关系。时间压力越大,任务完成时间越长,工作负荷越大。在正确率方面,则存在不同结果:董晓璐<sup>[10]</sup>、王庄<sup>[16]</sup>和于航<sup>[17]</sup>等的研究证明,时间压力显著影响正确率;孙璐<sup>[18]</sup>和甘文娟<sup>[19]</sup>等研究显示,时间压力对正确率影响并不显著。未检索到摇摆条件下时间压力对操作员监视绩效影响的相关研究。

鉴于此,笔者拟关注摇摆条件下DCS操作员监视作业,开展典型DCS操作员监视试验,探究摇摆、时间压力对监视绩效和工作负荷的影响,以期为此类环境下操作员人因可靠性研究提供理论支持。

## 1 DCS操作员监视试验

### 1.1 被试

采用G\*Power 3.1软件<sup>[20]</sup>预估试验所需被试量。在中等效应(效应量 $f = 0.25$ )和0.05的显著性水平下,招募24名被试可达0.9的统计检验力。在我国,执照操作员在完成电厂操作任务的同时,还需要进行大量学习和培训,时间紧张,无法招募大量操作员来实验室参与试验。另外,研究表明:经过充分培训的人员工作绩效基本等同于技能型人才,执行任务时失误率同专业人员没有显著差异<sup>[21]</sup>。因此,有偿招募32名大学男生参与试验,年龄(19.34 $\pm$ 1.26)岁,右利手,视力正常或者矫正后正常,无色盲和色弱,无神经疾病,未有类似摇摆环境工作或试验经验。签署被试知情同意后开始正式试验,试验前一晚保证睡眠质量,并且试验前24h禁止饮酒、喝茶或者咖啡以及其他可能刺激大脑的食品。

### 1.2 监视任务

在DCS中,操作员通过获取相关状态信息(如组件设备参数信息、警报信息、规程信息和运行趋势

等),监视系统运行并进行状态评估与控制<sup>[22]</sup>。根据信息呈现方式,可将操作员监视信息分为状态信息、数字信息、图形信息和语音信息等。状态信息指用特定颜色、符号描述系统或组件设备状态(如是否可用、导通、开闭、启停以及量的多少等)或工况(如是否危险、故障以及正常等)的信息,是判断系统运行状态的重要依据。数字信息是指以阿拉伯数字呈现的系统状态或组件设备参数的定量数值,例如核电厂温度、压力、流量、硼浓度和放射性水平等,属于系统运行安全相关重要参数。因此,主要关注 DCS 中操作员数字信息和状态信息监视作业:数字信息类任务主要判断系统相关参数是否与规程或者要求一致,简称数据比较任务;状态信息类任务主要确定设备状态是否符合规程或者要求,简称状态确认任务。

1.2.1 任务素材

核电属于典型复杂大型 DCS,在核电厂运行各阶段,操作员需要监视大量信息,为状态评估、响应计划和响应执行奠定基础<sup>[22]</sup>。试验以某海上浮动核电站蒸汽发生器传热管道破裂事故情况下的操作员监视任务为对象,选取存在数字信息和状态信息监视的 30 个任务作为素材,数据比较任务如“A 列蒸汽发生器总  $\gamma$  测量值是否  $\geq 6.0$ ”,状态确认任务如“控制棒是否插到底”。任务素材呈现于图 1 所示平台。



图 1 试验平台

Fig. 1 Experiment platform

1.2.2 因变量和自变量

监视任务绩效用监视任务用时(简称监视时间)及监视正确率(简称正确率)来表征;工作负荷则基于美国国家航天航空局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)所开发的任务负荷指数量表(Task Load Index, TLX),即 NASA-TLX<sup>[23]</sup>收集。因此,因变量为监视时间、正确率和工作负荷。自变量为摇摆条件(静止,低和高)和时间压力(无,有)。参照文献[6,8-9,24]的经验,设置 3 种

摇摆条件,见表 1。张力等<sup>[25]</sup>研究发现,国内某 DCS 模拟机操作员监视作业中,正确识别目标反应时小于 5 s。因此,将有时间压力条件设置为 5 s。

表 1 摇摆参数

Table 1 Vibrating parameters

自由度	静止		低摇摆		高摇摆	
	幅度/ mm	周期/ s	幅度/ mm	周期/ s	幅度/ mm	周期/ s
横向	$\pm 0$	0	$\pm 50$	8	$\pm 90$	8
纵向	$\pm 0$	0	$\pm 50$	4	$\pm 90$	4
垂直	$\pm 0$	0	$\pm 50$	4	$\pm 90$	4

1.2.3 试验流程

1) 试次试验顺序。监视任务在 6 种试验条件下进行(3 摇摆级别 $\times$ 2 时间压力),每种条件下完成 30 个试次(图 2):①指令,如确认控制棒棒位信息,被试阅读并理解指令,按空格键进入下一步。②注视点“+”,提示集中注意力,1 s 后自动进入下一步。③任务界面,被试搜索目标信息并理解其状态或记住其参数,无时间压力条件下按空格键进入下一步,有时间压力条件下被试按空格键或 5 s 后自动进入下一步,停留时间记为监视时间。④问题回答界面,该界面上出现与指令相关监视信息判断,正确按 j 键,错误按 f 键,有时间压力条件下存在 5 s 限时,回答问题的正确率记为监视任务的正确率。⑤空白屏幕。

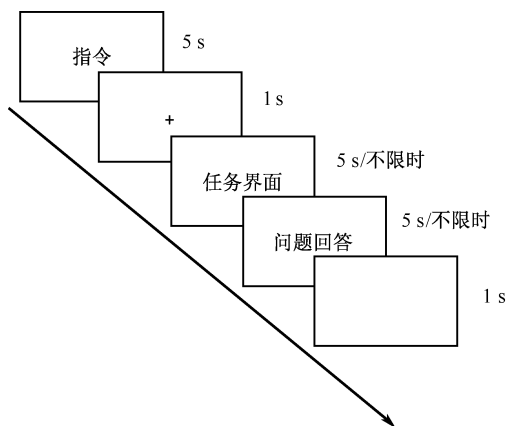


图 2 试次顺序

Fig. 2 Experiment scheme in each trial

2) 试验步骤。①开始,介绍试验背景和基本要求,被试填写个人信息,签署知情同意书。②培训,进行蒸汽发生器传热管道破裂事故、规程和界面方面的培训,确保被试熟悉试验任务;同时,被试适应摇摆台。③训练,被试进行练习,主动报告已熟悉试验任务且正确率达到 100%后方可进入正式试验。

④正式试验,被试按照拉丁方所确定的顺序进行某种条件下的试验,完成后填写 NASA-TLX 量表。1 种试验条件完成后,被试休息 5 min 以上,被试反应无疲劳,则进入下一条件下的试验,直至所有 6 种试验条件全部完成。⑤结束,被试报告无眩晕后,离开试验平台;主试整理试验数据。

### 1.3 数据处理及分析

试验共获得 192 组(32 名被试 × 3 摇摆级别 × 2 时间压力条件)监视绩效数据与工作负荷数据。有时间压力条件下,若被试在 5 s 内按键进入下一界面,则取实际时间为监视时间;若被试未按键,则取 5 s 为监视任务用时,且视为监视失误。进行描述性统计以分析不同试验条件下监视任务绩效与工作负荷。采取多因素方差分析以比较摇摆条件和时间压力对监视任务绩效与工作负荷的影响。利用 Duncan 事后多重比较以探究不同条件下监视绩效和工作负荷的差异。利用 Excel 2019 汇总和整理数据,使用 SPSS 19.0 进行统计学分析,显著性水平  $\alpha=0.05$ 。

## 2 监视任务绩效与工作负荷

### 2.1 监视绩效

不同摇摆、时间压力和任务类型下监视任务绩效见表 2。摇摆对监视时间和正确率影响均不显著( $p>0.05$ ),随着摇摆级别的增加,正确率差异不明显,但监视时间呈现上升趋势。时间压力显著影响监视时间( $p<0.01$ ),且无时间压力下监视时间显著大于有时间压力。时间压力对正确率影响不显著( $p>0.05$ ),但无时间压力下正确率稍高于有时间压力。任务类型对监视时间影响显著( $p<0.0001$ ),且状态确认任务下监视时间显著大于数据比较任务;任务类型对正确率影响不显著( $p>0.05$ )。摇摆级别、时间压力和任务类型对监视绩效无二阶、三阶效应( $p>0.05$ )。

表 2 摇摆、时间压力和任务类型下监视任务绩效

Table 2 Monitoring performance under conditions of vibrating, time pressure and task

因素	级别	正确率/%	监视时间/ms
摇摆	静止	96.29±5.62	1 794.55±613.19
	低摇摆	96.37±5.94	1 828.80±618.08
	高摇摆	96.45±5.40	1 843.62±587.87
时间压力	无	96.90±5.48	1 915.40±661.86
	有	95.83±5.77	1 729.25±528.39
任务类型	数据比较	96.51±5.95	1 540.80±479.10
	状态确认	96.22±5.34	2 103.85±588.04

将监视绩效数据按照任务类型分组,以探究不同监视信息下摇摆(图 3)和时间压力(图 4)对监视绩效的影响。数据比较任务中,摇摆对监视时间和正确率影响均不显著( $p>0.05$ ),时间压力对正确率影响不显著,但显著影响监视时间( $p<0.05$ );状态确认任务中,摇摆对监视时间和正确率影响均不显著( $p>0.05$ ),时间压力显著影响监视时间和正确率( $p<0.05$ )。

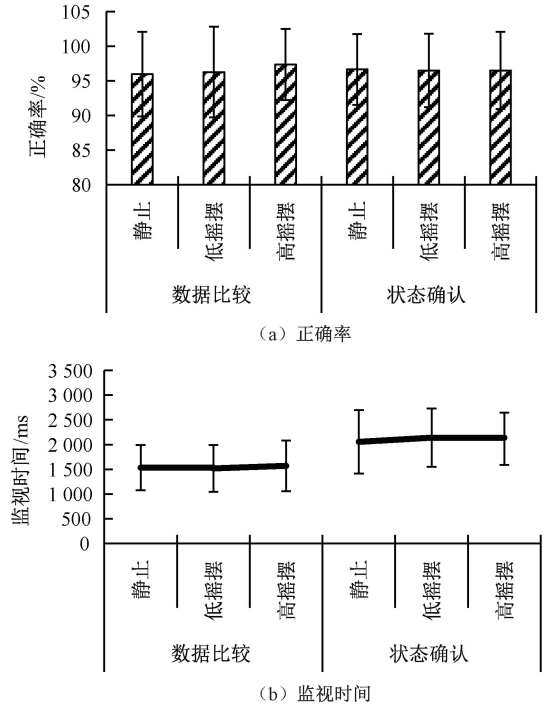


图 3 摇摆条件下监视绩效

Fig. 3 Monitoring performance under vibrating conditions

### 2.2 工作负荷

不同摇摆和时间压力条件下工作负荷见表 3。摇摆仅显著影响体力需求( $p<0.05$ ),且摇摆条件下大于静止条件,但是低摇摆和高摇摆条件下差异不显著。虽然摇摆对 NASA-TLX 量表其他 5 个维度以及 NASA 总分影响不显著( $p>0.05$ ),但是摇摆条件下评分都大于静止条件(表 3)。时间压力对心智需求、时间需求以及 NASA 总分影响显著( $p<0.05$ ),且均为有时间压力下评分大于无时间压力。虽然时间压力对其他维度影响不显著( $p>0.05$ ),但有时间压力条件下评分均高于无时间压力条件(表 3)。摇摆和时间压力对工作负荷无二阶效应( $p>0.05$ )。

表 3 不同摇摆和时间压力条件下工作负荷

Table 3 Workload under different vibration and time pressure conditions

因素	级别	心智需求	体力需求	时间需求	挫折程度	自我绩效	努力程度	NASA 总分
摇摆条件	静止	5.78±3.39	4.16±2.60	5.47±4.11	4.72±3.16	6.66±4.74	4.05±2.98	30.83±16.24
	低摇摆	6.06±3.27	5.64±3.84	5.97±3.49	4.75±3.07	7.23±4.81	4.30±3.06	33.95±16.34
	高摇摆	6.75±3.63	5.92±4.07	6.44±3.94	4.45±2.85	7.25±3.89	4.70±3.44	35.52±16.45
时间压力	无	5.70±3.08	4.94±3.38	5.21±3.67	4.31±3.05	6.78±4.38	4.16±3.24	31.09±15.36
	有	6.70±3.71	5.54±3.85	6.71±3.92	4.97±2.95	7.31±4.59	4.54±3.09	35.77±17.09

表 4 文献中摇摆条件下视觉搜索工作绩效

Table 4 Visual search performance under vibrating conditions in literature

文献	任务	级别	时间/s	正确率/%	备注
XUE Hongjun 等 <sup>[8]</sup>	单目标	静止	2.30	99.2	影响不显著
		轻微	2.21	98.9	
		中等	2.29	98.8	
	双目标	静止	3.80	97.5	
		轻微	3.84	97.8	
		中等	3.82	97.1	
TAO Da 等 <sup>[9]</sup>	无目标	静止	4.40	85.0	
		纵摇	4.60	92.9	
		艏摇	4.50	96.4	
	单目标	静止	2.40	26.5	
		纵摇	2.40	28.3	
		艏摇	2.40	29.5	
	双目标	静止	4.00	17.4	
		纵摇	3.90	18.8	
		艏摇	4.00	20.4	
三目标	静止	5.50	11.92		
	纵摇	5.30	13.1		
	艏摇	5.40	14.1		
蔡剑 <sup>[26]</sup>	单目标	静止	2.44	98.7	
		轻微	2.38	98.6	
		中等	2.45	98.8	
	双目标	静止	4.30	97.3	
		轻微	4.20	97.7	
		中等	4.24	97.6	

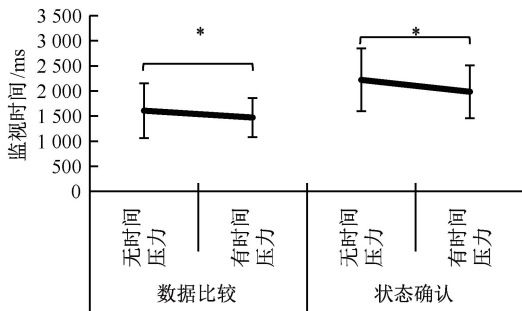
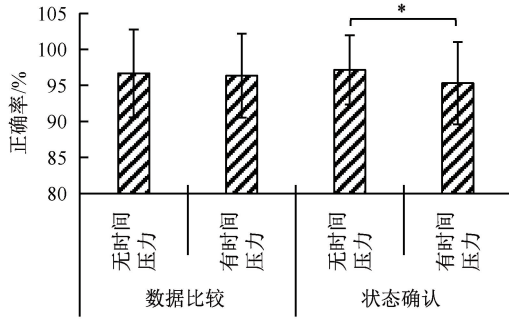


图 4 时间压力条件下监视绩效

Fig. 4 Monitoring performance under time pressure conditions

### 3 讨论

#### 3.1 摇摆、时间压力对监视绩效的影响

摇摆对操作员监视时间和正确率影响均不显著 ( $p > 0.05$ )。由于未检索到摇摆条件下监视任务绩效相关文献, 仅与类似环境下视觉搜索相关文献<sup>[8-9,26]</sup>对比, 结果汇总见表 4。摇摆对视觉搜索任务时间影响不显著 (表 4), 与试验结果基本一致 (表 2)。因此, 得知: 在摇摆程度不太剧烈的情况下, 监视作业正确率与静止条件基本一致。但试验中摇摆条件下监视时间大于静止条件, 且随着摇摆条件增加, 监视时间呈现上升趋势 (表 2)。因此, 若摇摆级别高于试验条件, 监视时间可能进一步增加, 从而造成差异显著, 还需要进一步研究。

时间压力显著影响监视时间 ( $p < 0.01$ ), 对正确率影响不显著 ( $p > 0.05$ )。由于未检索到类似环境下 DCS 监视绩效相关研究成果, 在此仅与陆基核电站相关研究<sup>[10,17-19]</sup>对比, 将这些研究中不同时间压力条件下的任务执行时间和失误率汇总见表 5: ①时间压力显著影响任务完成时间, 与试验研究结果一致。②董晓璐<sup>[10]</sup>和于航<sup>[17]</sup>等研究中失误率受时间压力影响, 这 2 篇文献均采用高、低 2 种时间压力条件, 高时间压力下时间紧张但可以完成任务, 低时间压力下时间足够但不宽裕, 高压条件下时间紧张可能就是造成失误率显著升高的原因。③孙璐<sup>[18]</sup>和甘文娟<sup>[19]</sup>等研究中时间压力仅显著影响任

务完成时间,对失误率影响不显著,与试验结果完全一致;这2篇文献均采用有、无2种时间压力条件,在时间条件压力不高的情况下,监视失误率差异不大。得出在本试验条件下,5 s为较低时间压力条件,虽然显著影响监视任务完成时间,但是对失误率的影响并不显著。但若摇摆级别升高,失误率可能会显著升高,因此,还需要开展相关试验进行进一步研究。

表5 陆基核电站时间压力对工作绩效的影响

Table 5 Effect of time pressure condition on work performance in Nuclear Power Plants

文献	时间压力条件	时间/s	失误率/%	备注
董晓璐 <sup>[10]</sup>	传统界面	高(25 s)	10.02	8.50
		低(40 s)	12.36	1.00
	生态界面	高(25 s)	10.46	4.40
		低(40 s)	11.43	1.20
于航 <sup>[17]</sup>	高(25 s)	6.26	5.60	影响显著
	低(40 s)	7.46	3.60	
孙璐等 <sup>[18]</sup>	有(12 min)	5.22	1.06	仅显著影响任务时间
	无	9.03	0.96	
甘文娟 <sup>[19]</sup>	有(613 s)	7.61	0.16	
	无	9.71	0.14	

数据比较任务监视时间显著短于状态确认任务( $p < 0.0001$ ),但二者正确率差异不显著( $p > 0.05$ )。数据比较任务中,被试搜索任务目标并比较数据,由于无需计算或单位换算,用时较短。状态确认任务中,被试搜索任务目标并确认其状态,通常需要观察1个以上目标才能确定状态,从而导致监视时间增长。这种情况在DCS中普遍存在,例如:为确保信号准确性,常采用“ $\geq 2/3$ ”冗余设计,即采用3个冗余信号进行表决,2个以上满足即认为条件满足。

### 3.2 摇摆、时间压力对工作负荷的影响

摇摆仅影响显著体力需求( $p < 0.05$ ),对其他5个维度以及NASA总分影响不显著( $p > 0.05$ ),但摇摆条件下工作负荷评分均高于静止条件(表3)。计算“ $K = \text{摇摆条件下工作负荷} / \text{静止条件下工作负荷}$ ”,以探究摇摆条件对工作负荷的影响程度。试验中,低摇摆、高摇摆条件下 $K$ 值分别为1.10和1.15。陶达等<sup>[22]</sup>在晃动条件下触摸屏操作试验中,轻微、中度晃动条件下 $K$ 值分别约为1.13和1.33。文中 $K$ 值低于陶达等<sup>[22]</sup>研究的数据,这可能与任务类型有关,文中为监视试验,而陶达等<sup>[22]</sup>中为触摸操作试验,被试需要根据指令在触摸屏上进行操作,被试可能需要付出更多的努力以完成触摸操作。

时间压力显著影响心智需求、时间需求以及NASA总分,且其他4个维度下,有时间压力下分值高于无时间压力。检索数字化核电厂领域时间压力相关且采用NASA-TLX量表分析工作负荷的文献<sup>[16-18]</sup>,并计算“ $R = \text{有时间压力下工作负荷} / \text{无(低)时间压力下工作负荷}$ ”以确定时间压力对工作负荷的影响程度,见表6。虽然任务类型、时间压力条件以及工作环境都不尽相同,但文中 $R$ 值与于航<sup>[17]</sup>和孙璐等<sup>[18]</sup>等的研究结果具有较好一致性;王庄<sup>[16]</sup>研究中 $R$ 值相对较低,但文中没有无压力条件这种情况,可能造成 $R$ 值偏低。因此,文中5 s时间压力条件使得工作负荷约增加1.15倍。

表6 时间压力条件下工作负荷 $R$ 值

Table 6  $R$  value of workload under time pressure conditions

试验	时间压力条件	$R$ 值	备注
文中	有(5 s),无	1.15	摇摆
王庄 <sup>[16]</sup>	高(系数0.8)	1.10	静止
	较高(系数0.9)	0.88	
	中(系数1)	1.06	
	较低(系数1.2)	1.02	
	低(系数1.4)	1.00	
于航 <sup>[17]</sup>	高(25 s),低(40 s)	1.2	静止
孙璐等 <sup>[18]</sup>	有(12 min),无	1.14	静止

## 4 结论

1) 摇摆对DCS操作员监视任务绩效影响不显著。但随着摇摆级别的增加,监视时间呈现上升趋势。当摇摆级别进一步增大时,监视任务绩效可能存在显著差异。

2) 在摇摆条件下,5 s为较低时间压力条件,虽然显著影响监视任务完成时间,但是对失误率的影响并不显著,在该时间压力下,操作员能够较好地完成监视任务。

3) DCS监视任务中,状态类信息用时较多,数据类信息用时相对较少,但二者正确率差异不显著。在实际中,建议减少数据类信息的计算和单位换算,减少监视用时,降低监视作业工作负荷。

4) 摇摆对DCS操作员监视任务工作负荷影响不显著,但摇摆条件下体力负荷显著高于静止条件。随着摇摆级别的增加,工作负荷呈现上升趋势,低摇摆和高摇摆工作负荷分别约为静止条件的1.10和1.15倍。时间压力对DCS操作员监视任务工作负荷影响显著,5 s时间压力下工作负荷约为静止条件的1.15倍。

## 参 考 文 献

- [1] 张力. 数字化核电厂人因可靠性[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019:12-14.
- [2] 秦庭荣, 周歆捷, 何荣杰, 等. 基于 STPA-FCM 模型的自主航行船舶功能系统分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(8):8-14.  
QIN Tingrong, ZHOU Xinjie, HE Xingjie, et al. Analysis of functional systems of MASS based on STPA-FCM model[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(8): 8-14.
- [3] 牛莉霞, 李肖萌. 5G 时代智慧矿山安全管理新模式[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(6):29-36.  
NIU Lixia, LI Xiaomeng. A new safety management model of intelligent mines in 5G ear[J]. China Safety Science Journal, 2023, 2021, 31(6): 29-36.
- [4] 龙时丹. 面向高速铁路的全自动运行系统应用[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(增 1):92-97.  
LONG Shidan. Application of automatic operation system for high-speed railway[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(S1): 92-97.
- [5] 张力, 韦海峰. 数字化人机界面操纵员监视过程中信息搜集失误试验研究[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(5): 191-195.  
ZHANG Li, WEI Haifeng. Experimental study on the data collecting errors with the operator's monitoring of the digitalized human-machine interface[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(5): 191-195.
- [6] TAO Da, ZENG Jihong, LIU Kaifeng, et al. Effects of control-to-display gain and operation precision requirement on touchscreen operations in vibration environments[J]. Applied Ergonomics, 2021, 91(2): DOI:10.1016/j.apergo.2020.103293.
- [7] LIN Joechiuhsiangjoe, LIU Chino, CHAO Chinjung, et al. The performance of computer input devices in a vibration environment[J]. Ergonomics, 2010, 53(4): 478-490.
- [8] XUE Hongjun, TAO Da, WANG Tieyan, et al. Visual search in vibration environments: effects of spatial ability, stimulus size and stimulus density[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2020, 79(5): DOI:10.1016/j.ergon.2020.102988.
- [9] TAO Da, REN Xinyuan, LIU Kaifeng, et al. Effects of color scheme and visual fatigue on visual search performance and perceptions under vibration conditions[J]. Displays, 2024, 82(2): DOI:10.1016/j.displa.2024.102667.
- [10] 董晓璐. 数字化界面设计方法与时间压力对失误的影响[D]. 北京: 清华大学, 2010.  
DONG Xiaolu. Influence of human-system interface design method and time pressure on human error[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [11] CHANG Y H J, MOSLEH A. 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): 997-1 013.
- [12] ANDREWS J, SMITH D C. In search of the marketing imagination: factors affecting the creativity of marketing programs for mature products[J]. Journal of Marketing Research, 1996, 33(2): 174-187.
- [13] 袁悦, 吴志明, 谢秋实. 时间压力对个体工作结果的作用效果:基于元分析的证据[J]. 心理科学进展, 2024, 32(3): 465-485.  
YUAN Yue, WU Zhiming, XIE Qiushi. The effect of time pressure on individual work outcomes: a meta-analytic review[J]. Advances in Psychological Science, 2024, 32(3): 465-485.
- [14] BAER M, OLDDHAM G R. The curvilinear relation between experienced creative time pressure and creativity: moderating effects of openness to experience and support for creativity[J]. Journal of Applied Psychology, 2006, 91(4): 963-970.
- [15] PENG Shuo, WU Changxu, YU Jiahao. The effect of font boldness, noise disturbance and time pressure on human error in the context of cloud change operation[J]. Ergonomics, 2024, 67(10): 1 301-1 316.
- [16] 王庄. 任务复杂度和时间压力对计算机化规程操作绩效的影响[D]. 北京: 清华大学, 2012.  
WANG Zhuang. Effects of task complexity and time pressure on operation performance of computerized procedures[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [17] 于航. 数字化界面下心理特征与时间压力对人的绩效的影响[D]. 北京: 清华大学, 2011.  
YU Hang. Influence of psychological characteristics and time pressure on human performance on digital interfaces[D].

Beijing: Tsinghua University, 2011.

- [18] 孙璐, 张力, 青涛, 等. 时间压力对数字化核电厂主控室操纵员心理负荷和作业绩效的影响[J]. 应用能源技术, 2016, 30(2): 42-47.  
SUN Lu, ZHANG Li, QING Tao, et al. The study on the impact of time pressure on mental workload and operation performance in a digital control room of nuclear power plant[J]. Applied Energy Technology, 2016, 30(2): 42-47.
- [19] 甘文娟. 界面管理任务复杂度与时间压力对数字化核电厂操纵员作业绩效的影响研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2017.  
GAN Wenjuan. The impact of complexity of interface management tasks and time pressure on the operators' performance in digital nuclear power plant[D]. Hengyang: University of South China, 2017.
- [20] FAUL F, ERDFELDER E, LANG A G, et al. G \* Power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences[J]. Behavior Research Methods, 2007, 39(2): 175-191.
- [21] 张力, 胡鸿, 李鹏程, 等. 数字化核电厂操纵员监视行为可靠性分析及其应用[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(5): 921-929.  
ZHANG Li, HU Hong, LI Pengcheng, et al. Reliability analysis of operator's monitoring behavior in digital main control room of nuclear power plants and its application[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(5): 921-929.
- [22] 张力, 鄢跃勇, 戴立操, 等. 基于 SOP 的核电厂数字化主控室操纵员监视行为可靠性研究[J]. 核动力工程, 2015, 36(6): 109-114.  
ZHANG Li, YAN Yueyong, DAI Licao, et al. Study on reliability of monitoring behavior of operator in digitized main control room of Nuclear Power Plants based on SOP[J]. Nuclear Power Engineering, 2015, 36(6): 109-114.
- [23] HART S G, STAVELAND L E. Development of NASA-TLX (task load index): results of empirical and theoretical research[J]. Advances in Psychology, 1988, 52(5): 139-183.
- [24] 陶达, 蔡剑, 张旭, 等. 晃动环境下触摸屏手势操作的可用性研究[J]. 工业工程与管理, 2019, 24(5): 177-181.  
TAO Da, CAI Jian, ZHANG Xu, et al. Assessing the usability of touchscreen gestures in shaking conditions[J]. Industrial Engineering and Management, 2019, 24(5): 177-181.
- [25] 张力, 韦海峰, 胡鸿, 等. 数字化主控室操纵员监视过程中目标识别失误实验研究[J]. 工业工程与管理, 2013, 18(6): 134-138, 146.  
ZHANG Li, WEI Haifeng, HU Hong, et al. Experimental research on monitoring target identification errors of operator in digitalized main control room[J]. Industrial Engineering and Management, 2013, 18(6): 134-138, 146.
- [26] 蔡剑. 晃动状态、视觉疲劳和界面配色方案对视觉搜索绩效的影响机制研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2020.  
CAI Jian. Research on the influence mechanism of vibration, visual fatigue and color scheme on visual search performance[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2020.

**作者简介:** 胡鸿 (1979—), 男, 湖南邵阳人, 博士, 教授, 主要从事人因可靠性方面的研究。E-mail: fengzhisu16@163.com。

